

## **TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN TOIMIALA**

**Kone- ja tuotantotekniikka**

**Energia- ja ympäristötekniikka**

## **INSINÖÖRITYÖ**

### **HIILIDIOKSIDIPÄÄSTÖJEN, TALTEENOTTO-, VARASTOINTI- JA HYÖTYKÄYTTÖMENETELMÄT**

**Työn tekijä: Jaakko Pajanen  
Työn valvoja: Markku Laukka  
Työn ohjaaja: Markku Laukka**

**Työ hyväksytty: \_\_. \_\_. 2007**

**Markku Laukka  
DI**

## **ALKULAUSE**

Tämä insinöörityö tehtiin Helsingin ammattikorkeakoulu Stadialle DI Markku Laukan pyynnöstä. Haluan kiittää projektissa mukana olleita henkilöitä sekä työni ohjaajaa Markku Laukkaa.

Helsingissä 4.11.2007

Jaakko Pajanen

## INSINÖÖRITYÖN TIIVISTELMÄ

Tekijä: Jaakko Pajanen	
Työn nimi: Hiilidioksidipäästöjen talteenotto-, varastointi- ja hyötykäyttömenetelmät	
Päivämäärä: 4.11.2007	Sivumäärä: 47
Koulutusohjelma: Kone- ja tuotantotekniikka	Suuntautumisvaihtoehto: Energia ja ympäristötekniikka
Työn valvoja: DI Markku Laukka Työn ohjaaja: DI Markku Laukka	
<p>Tässä opinnäytetyössä oli tavoitteena selvittää hiilidioksidipäästöjen vähentämiskeinoja, niiden talteenottoa, varastointia sekä erilaisia hyötykäyttömenetelmiä.</p> <p>Hiilidioksidin talteenottomenetelmät voimalaitoksista jaettiin kolmeen pääryhmään: polttoa ennen tapahtuva talteenotto, rikastettu happipolttomenetelmä ja jälkipolttotalteenotto. Talteenottomenetelmät jaettiin vielä prosessien ohella kemialliseen ja fysikaaliseen absorptiomenetelmään, adsorptiomenetelmään, kryogeeniseen menetelmään, membraanimenetelmään sekä muihin menetelmiin.</p> <p>Kuljetusmenetelmistä tärkeimmiksi muodostuivat putkistokuljetus sekä kuljetus meriteitse joustavuutensa ja taloudellisuutensa vuoksi.</p> <p>Tärkeimpiä hiilidioksidin varastointimenetelmiä ovat geologinen ja merenalainen varastointi. Geologinen varastointi sisältää hiilidioksidin varastointia käytöstä poistettuihin hiilikenttiin, akvifereihin, syviin suolakerrostumiin ja louhintaan sopimattomiin hiilikenttiin. Merenalainen varastointimenetelmä on lähinnä vasta kehitys- ja testausvaiheessa.</p> <p>Hiilidioksidin hyötykäyttömenetelmistä tärkeimpiä ovat parannettu öljyn pumppaus ja metanin talteenotto hiilidioksidin avulla. Muita käyttökohteita on elintarviketeollisuus.</p> <p>Matalampiin hiilidioksidipäästöihin päästään suosimalla energiantuotannossa uusiutuvia energianlähteitä ja ydinvoimaa sekä lisäämällä joukkoliikenteen käyttöä.</p>	
Avainsanat: hiilidioksidi, hyötykäyttö, talteenotto	

## ABSTRACT

Name: Jaakko Pajanen	
Title: Carbon Dioxide Emissions Recovery, Storage and Utilization Methods	
Date: November 4th	Number of pages: 47
Department: Mechanical Engineering	Study Programme: Energy Engineering and Environmental Technology
Instructor: Markku Laukka, MEng, Lecturer	
Supervisor: Markku Laukka, MEng, Lecturer	
<p>The main purpose of this graduate study was to examine how to reduce carbon dioxide emissions. The study also aimed at examining carbon dioxide recovery technologies, storage and utilization.</p> <p>First, the study focused on various carbon dioxide recovery methods at power plants. Recovery methods were divided into three main groups, i.e. the precombustion recovery method, the oxy-fuel recovery method and the post-combustion recovery method. The recovery methods were subdivided into six different methods such as the chemical and physical absorption, adsorption, cryogenic and membrane methods, and other methods.</p> <p>Next, the focus was on the transportation of carbon dioxide. The delivery of carbon oxide by means of pipelines and by ship proved to be the best alternative because of flexibility and economic efficiency.</p> <p>The study then concentrated on storing carbon dioxide. Carbon dioxide storage options were divided into two main groups, i.e. geological and ocean storage. In the geological storage method, the carbon dioxide is stored into depleted oil and gas fields, deep saline formations, aquifers and into inextractible coal fields. The suitability of ocean storage as a storing method is open because ocean storage is still at a developing and testing stage.</p> <p>Finally, the study focused on the utilization of carbon dioxide. Carbon dioxide can be utilized especially in enhancing oil pumping and in methane recovery as well as in the food industry.</p> <p>As a result, the graduate study produced a description of reduction methods of carbon dioxide emissions as well as of carbon dioxide recovery technologies and of storage and utilization. Lower carbon dioxide emissions were achieved by promoting the use of renewable energy sources and nuclear power in energy production, and by promoting the use of public transport vehicles.</p>	
Keywords: carbon dioxide, utilization, capture	

# SISÄLLYS

## ALKULAUSE

## TIIVISTELMÄ

## ABSTRACT

<b>1</b>	<b>JOHDANTO</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>KASVIHUONEILMIÖ JA KASVIHUONEKAASUT</b>	<b>2</b>
2.1	Kasvihuoneilmiön vaikutus ilmastoon	2
2.2	Hiilidioksidi	3
2.3	Metaani	5
2.4	Muut kaasut	6
<b>3</b>	<b>HIILIDIOKSIDIPÄÄSTÖJEN VÄHENTÄMINEN</b>	<b>7</b>
3.1	Liikenne	7
3.2	Uusiutuva energia ja bioenergia	8
3.3	Ydinenergia	9
<b>4</b>	<b>HIILIDIOKSIDIN EROTUS JA TALTEENOTTOMENETELMÄT</b>	<b>9</b>
4.1	Talteenotto ennen polttoa	11
4.2	Rikastettu happipoltto	13
4.3	Jälkipolttotalteenotto	14
4.4	Hiilidioksidin talteenottomenetelmät polton jälkeisistä savukaasuista	14
4.4.1	<i>Absorptiomenetelmä</i>	15
4.4.2	<i>Adsorptiomenetelmä</i>	17
4.4.3	<i>Kryogeeninen menetelmä</i>	19
4.4.4	<i>Membraanimenetelmä</i>	19
4.5	Muita hiilidioksidin talteenottomenetelmiä	22
4.5.1	<i>Kemiallinen kiertopoltto</i>	22
4.5.2	<i>Polttokennot</i>	24
4.5.3	<i>Kuiva regeneroiva absorptiomenetelmä</i>	26
4.6	IGCC-voimalaitos	28
<b>5</b>	<b>HIILIDIOKSIDIN KULJETUS JA VARASTOINTI</b>	<b>30</b>
5.1	Putkilinjastot	30
5.2	Kuljetus laivoilla	31
5.3	Kuljetus kuorma-autoilla	32

<b>5.4</b>	<b>Geologinen varastointi</b>	<b>33</b>
5.4.1	<i>Käytöstä poistetut öljy- ja kaasuvarastot</i>	33
5.4.2	<i>Syvät suolapitoiset muodostumat</i>	34
5.4.3	<i>Louhintaan sopimattomat hiilikerrostumat</i>	34
5.4.4	<i>Akvifereihin varastointi</i>	35
<b>5.5</b>	<b>Merenalainen varastointi</b>	<b>36</b>
<b>6</b>	<b>HIILIDIOKSIDIN HYÖTYKÄYTTÖ</b>	<b>37</b>
6.1	<b>EOR-menetelmä</b>	38
6.2	<b>ECBM-menetelmä</b>	39
6.3	<b>Muita menetelmiä</b>	40
<b>7</b>	<b>YHTEENVETO</b>	<b>41</b>
	<b>VIITELUETTELO</b>	<b>44</b>

## 1 JOHDANTO

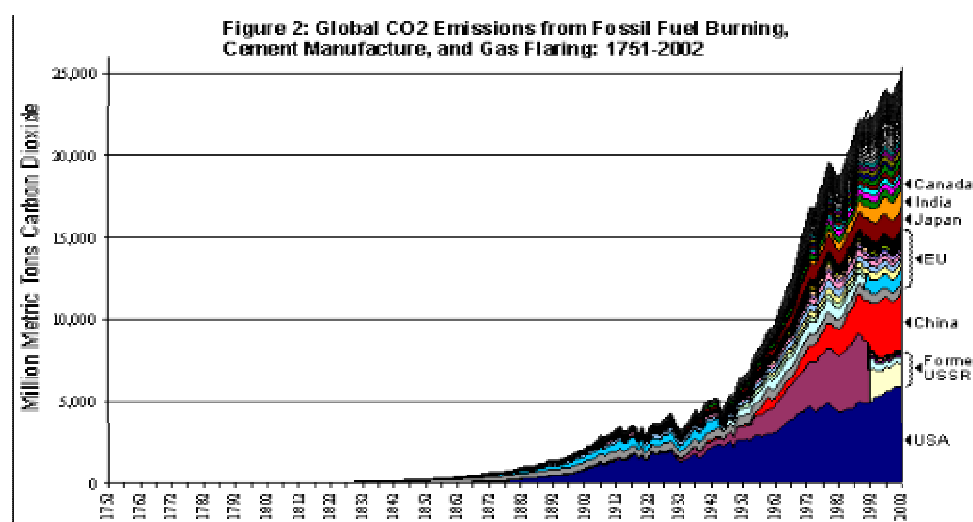
Työn tarkoituksena on perehtyä nykypäivänä teollisuuden ja voimalaitosten käytössä oleviin hiilidioksidin erotus- ja talteenottomenetelmiin. Lisäksi perehdytään talteenotetun hiilidioksidin varastointiin sekä erilaisiin käytössä ja kokeiluvaiheessa oleviin hyötykäyttömenetelmiin.

Hiilidioksidin erotusta ja talteenottoa on alettu hyödyntää viime vuosikymmeninä teollisuuden ja energiantuotannon voimalaitoksissa voimistuneen kasvihuoneilmiön ja jatkuvasti nousevien päästöjen seurauksena. Viimeisen sadan vuoden aikana hiilidioksidipäästöt ovat yli kymmenkertaistuneet, ja luku on jatkuvassa nousussa (kuva 1).

Tarkasteltaessa päästöjä yleiseltä kannalta päästäisiin jo huomattaviin parannuksiin siirtymällä yhä enemmän biopolttoaineiden ja uusiutuvan energian käyttöön. Näitä pidetäänkin tulevaisuuden tärkeimpinä energianlähteinä ympäristöystävällisyytensä takia.

Liikenteellä on myös oma suuri merkityksensä päästöjen aiheuttajana. Nykypäivänä onkin siirrytty käyttämään yhä enemmän ympäristöystävällisempiä polttoaineita, kuten maakaasua ja biodieseliä.

Tieto työhön on koottu internetissä julkaistuista tutkimuksista ja muilta aiheita käsitteleviltä verkkosivuilta.



Kuva 1. Hiilidioksidipäästöjen kehitys vuosina 1751–2002 /1/.

## 2 KASVIHUONEILMIÖ JA KASVIHUONEKAASUT

Kasvihuoneilmiö on ilmakehän lämpenemisen aiheuttama ilmiö, joka perustuu ilmakehässä oleviin kaasuihin. Auringon säteiden saavuttaessa ilmakehän ne lämmittävät maanpintaa ja heijastuvat sen jälkeen takaisin avaruuteen näkymättömänä infrapunasäteilynä. Ilmakehässä olevat kasvihuonekaasut estävät kuitenkin säteiden pääsyn takaisin avaruuteen, minkä seurauksena lämpö heijastuu takaisin maata kohti. Mikäli kyseiset kaasut yläilmakehästä puuttuisivat, olisi maapallomme noin 33 astetta kylmempi. Keskilämpötila olisi tällöin -18 astetta, jolloin elämä maapallolla ei olisi mahdollista. Kasvihuonekaasujen pitoisuudet ilmakehässä ovat lisääntyneet ihmisen toiminnan myötä, sen seurauksena ilmasto on lämmennyt vuosisatojen saatossa. /2, s. 52–53./

### 2.1 Kasvihuoneilmiön vaikutus ilmastoon

Voimistuneella kasvihuoneilmiöllä ja ilmaston lämpenemisellä on mm. seuraavia vaikutuksia:

- mannerjäätiköiden sulaminen
- merien pinnan nousu
- aavikoituminen
- merivirtojen muutokset ja mahdolliset pysähtymiset
- tiettyjen eliölajien väheneminen tai häviäminen.

Ilmastonmuutoksen kannalta tärkeimmät kasvihuonekaasut ovat vesihöyry ( $\text{H}_2\text{O}$ ), hiilidioksidi ( $\text{CO}_2$ ), metaani ( $\text{CH}_4$ ), otsoni ja typpidioksidi ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Ihmisen valmistamista synteettisistä kemikaaleista vaarallisimpia ovat kloorifluoratut hiilivedyt (CFC:t ja HCFC:t), fluoriyhdisteet (HFC:t, PFC:t ja FS6) sekä bromiyhdisteet (halonit). /3/

Taulukko 1 esittää kasvihuonekaasujen elinajan ilmakehässä. Kaasuja vertailtaessa käytetään yksikkönä lämmityspotentiaalia (Global Warming Potential). Tämä mittaa kaasun aiheuttamaa lämmitysvaikutusta hiilidioksidiin verrattuna massayksikköä kohden 20 tai 100 vuoden aikana. /4/



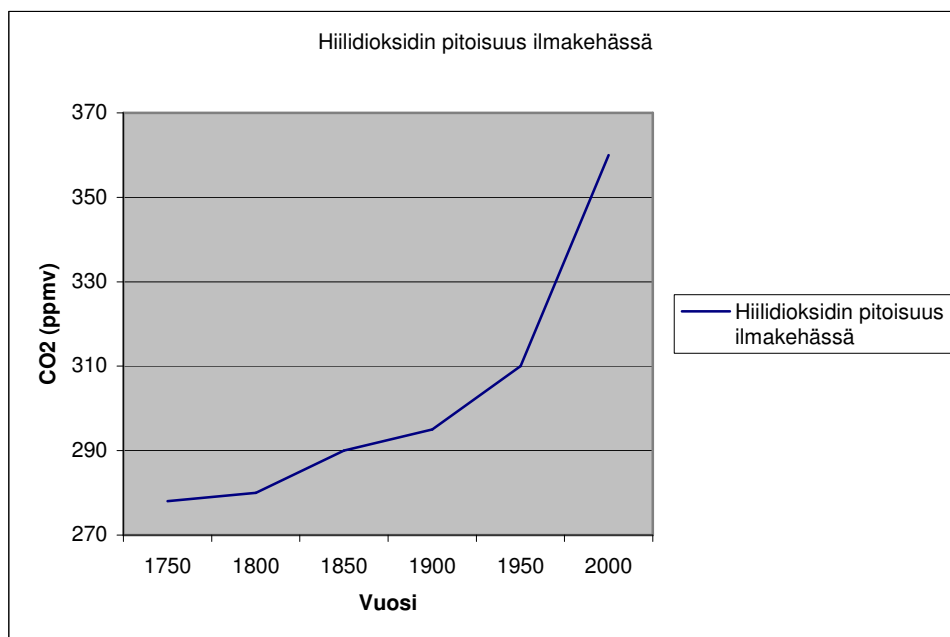
Taulukko 1. Kasvihuonekaasujen elinaika ilmakehässä /4/.

Kaasu	Elinaika	GWP 20 v	GWP 100v
CO <sub>2</sub>	50-200	1	1
CH <sub>4</sub>	12	62	23
N <sub>3</sub>	114	275	296
HFC:t	0,3-260	40-9400	12-12000
PFC:t	2600-50000	3900-8000	5700-11900
SF <sub>6</sub>	3200	15100	22200
CFC:t	45-170	4900-10200	4600-14000
HCFC:t	1,4-19	390-5200	120-2400
Halonit	11-65	3600-7900	130-6900

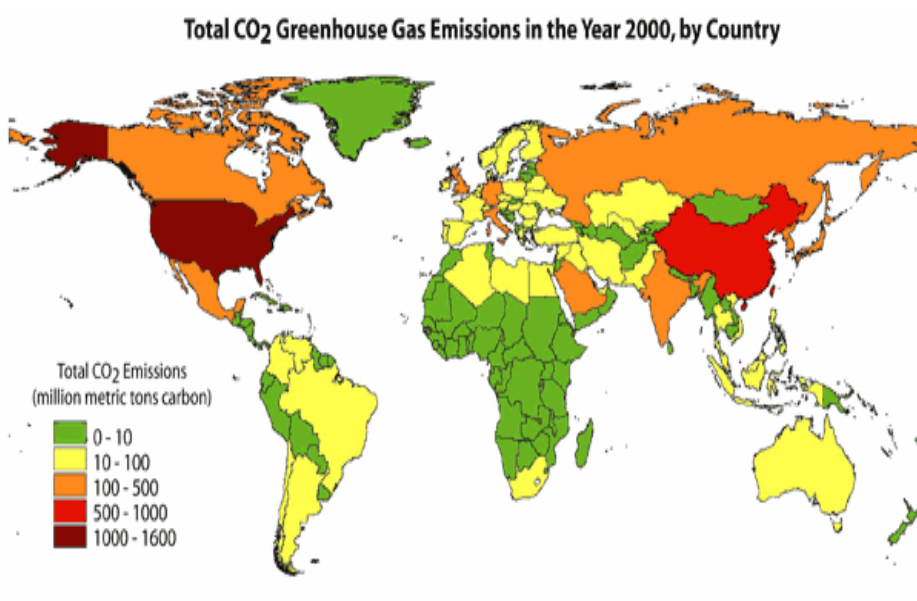
## 2.2 Hiilidioksidi

Hiilidioksidia syntyy kaikessa palamisessa mm. fossiilisia polttoaineita käytävissä voimalaitoksissa, liikenteessä ja metsien kaatamisen seurauksena. Hiilidioksidipäästöistä noin 80 prosenttia on peräisin fossiilisten polttoaineiden käytöstä. Hiilidioksidi on ihmisen aiheuttamista kasvihuonekaasuista merkittävin ja sen pitoisuus ilmakehässä on lisääntynyt esiteollisen ajan noin 280 tilavuusmiljoonasta noin 370:een, eli 0,037 prosenttiin (kuva 2).

Eniten hiilidioksidipäästöjä tuottavat suuret teollisuusmaat, kuten Yhdysvallat ja Kiina. Myös Eurooppa alueena tuottaa suuren määrän hiilidioksidipäästöjä (kuva 3). /5/



Kuva 2. CO<sub>2</sub>-päästöjen kehitys /5/.



Kuva 3. Maailman hiilidioksidipäästöt, tuhansia tonneja metrissä /6/.

Taulukosta 2 nähdään, että energiantuotanto ja liikenne ovat maapallolla suurin hiilidioksidin päästölähde. Myös metsien, varsinkin sademetsien hävittäminen on suuri ilmakehän hiilidioksidin lisääntymiseen vaikuttava tekijä. Taulukko 3 kuvaa yleisimpien käytössä olevien polttoaineiden hiilidioksidipäästöjä. /5/

*Taulukko 2. Tärkeimmät ihmisen aiheuttamat hiilidioksidilähteet /5/.*

Lähde	Osuus %	Määrä Gt
Energian tuotanto ja liikenne	75	19
Metsien hävittäminen	23	6
Muu teollisuus	3	0,7

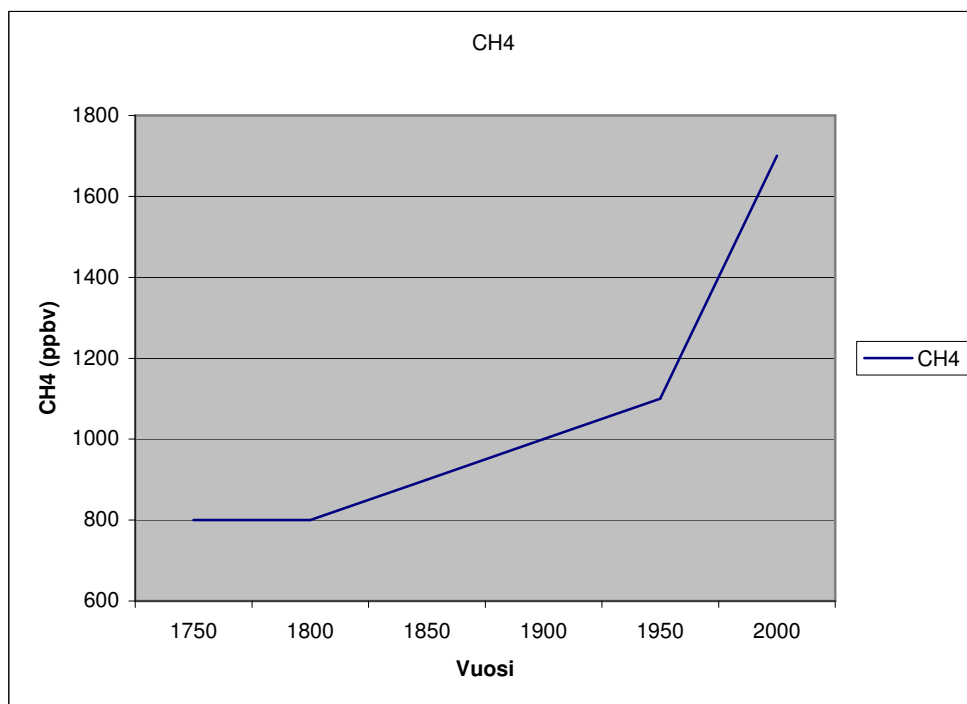
*Taulukko 3. Yleisimpien käytössä olevien polttoaineiden hiilidioksidipäästöt /5/.*

Polttoaine	Hiilidioksidin päästökerroin (kg/GJ)
Turve	104
Kivihiiil	93
Raskas polttoöljy	77
Kevyt polttoöljy	74
Maakaasu	56

## 2.3 Metaani

Metaani on ihmisen tuottamista kasvihuonekaasuista toiseksi merkittävin. Hiilidioksidiin verrattuna se on huomattavasti lyhytikäisempi, mutta lyhyellä aikavälillä sen vaikutus kasvihuoneilmiöön on monikymmenkertainen hiilidioksidiin verrattuna. Huolestuttavaa on myös se, että metaanin pitoisuus ilmakehässä on noussut lähes 150 % viime vuosikymmenten aikana (kuva 4).

/7/



Kuva 4. Metaanin pitoisuus ilmakehässä /7/.

## 2.4 Muut kaasut

Muihin tärkeimpiin kasvihuonekaasuihin luokitellaan typpioksidi, halogenoidut hiilivedyt ja rikkiheksafluoridi. Näitä kaasuja syntyy lannoituksen käytöstä, energiantuotannosta ja typpihapon valmistuksesta.

Halogenoiduiksi hiilivedyiksi luokitellaan yhdisteet, jossa osa tai kaikki vedystä on korvattu fluorilla, kloorilla tai bromilla. Halogenoidut hiilivedyt ovat täysin ihmisen aiheuttamia kaasuja, joten niitä ei esiinny luonnostaan ilmakehässä. Tärkeimpiä näiden käyttökohteita ovat jäädytyslaitteet sekä käyttöponneaineena. /8/

### 3 HIILIDIOKSIDIPÄÄSTÖJEN VÄHENTÄMINEN

Energiantuotanto ja teollisuus ovat maapallolla suurimmat hiilidioksidin tuottajat. Suurimpia päästölähteitä ovat tuotantolaitokset, joissa käytetään fossiilisia polttoaineita.

Energiantuotannon kannalta päästöjä voidaan vähentää muutamilla yksinkertaisilla asioilla:

1. vähentämällä energiankulutusta yleensä
2. vähentämällä energiaa runsaasti vievien tuotteiden kulutusta
3. lisäämällä vähäpäästöisiä tai päästöttömiä energianlähteitä
4. yhdistämällä ja lisäämällä sähkön ja lämmön yhteistuotantoa
5. hiilidioksidin talteenotolla.

Teollisuuden kannalta päästöjä voidaan vähentää:

1. käyttämällä metalliteollisuuden masuunikuonaa sementin valmistuksessa
2. kehittämällä korvaavia menetelmiä typpihapon valmistusprosessissa,
3. kehittämällä korvaavia menetelmiä elektroniikka teollisuuden prosesseissa. /9/

#### 3.1 Liikenne

Suomessa liikenne on toiseksi suurin kasvihuonekaasujen lähde ja suurin osa päästöistä tulee tieliikenteestä. Vuoteen 1980 verrattuna ovat liikenteen päästöt kaksinkertaistuneet, mikä johtuu lähinnä autokannan lisääntymisestä ja teknologian kehityksestä.

Liikenteen kannalta ajatellen on tulevaisuus haasteellinen. Jotta hiilidioksidipäästöjä saataisiin vähennettyä entisestään, tulisi yksityisautoilua vähentää huomattavasti ja siirtyä yhä enemmän joukkoliikenteen sekä kevyen liikenteen käyttöön.

Korkeaksi kehittynyt teknologia mahdollistaa nyt myös erilaisten biopolttoaineiden käytön erilaisissa moottoreissa. Pelkästään siirtyminen joukkoliikenteen käyttöön ja yhdistämällä nämä biopolttoaineisiin, toisi jo huomattavan vähennyksen hiilidioksidipäästöihin.

Tieliikenteen lisäksi muita suuria päästölähteitä on laiva- ja lentoliikenne. /10/

### 3.2 Uusiutuva energia ja bioenergia

Tällä hetkellä maailman energiantuotanto perustuu lähinnä fossiilisten polttoaineiden käyttöön, joiden osuus on noin 85 % koko energiantuotannosta.

Uusiutuviksi energianlähteiksi voidaan luokitella aurinkoenergia, tuuli-, vesi- ja aaltovoima. Nämä kaikki energiamuodot ovat hiilidioksidivapaita, eivätkä näin ollen lisää kasvihuoneilmiötä.

Aurinkoenergiaa voidaan kerätä sekä sähkön, että lämmön tuotantoon. Aurinkolämpö jaetaan passiiviseen ja aktiiviseen tekniikkaan. Passiivinen aurinkolämpö tarkoittaa rakennusten sijoittamista siten, että ne keräävät lämpöä mahdollisimman tehokkaasti ilman apuenergian käyttöä. Aktiivisella aurinkolämmöllä tarkoitetaan, että lämmön talteenotossa käytetään ulkoista apuvoimaa esim. talon veden lämmitykseen. Tyypillisiä keräimiä ovat lämpöpumput ja aurinkokeräimet. Aurinkoenergian hinnan ja kustannusten uskotaan laskevan tulevaisuudessa.

Tuulivoimateknologian kehitys on lähivuosina ollut voimakasta ja tuulivoima tuotannon osuus markkinoista kasvaa voimakkaasti. Yksikkökoot ovat kasvaneet megawattiluokkaisiksi ja voimaloiden kustannukset ovat laskeneet. Suurimmat tuulipuistot sijaitsevat Tanskassa ja Yhdysvalloissa, joissa voimaloita yhdessä tuulipuistossa saattaa olla jopa satoja. /11/

Vesivoima on merkittävä uusituvan energian sähköntuotantomuoto. Vesivoimalat ovat suosittuja, niiden käyttövarmuuden ja sääätömahdollisuuksiensa vuoksi. Vesivoimalassa energia tuotetaan hyödyntämällä vedenpintojen korkeuseroja. Vesivoiman etuja ovat, sen säännöstely energiankulutuksen mukaan ja varjopuolia ovat sääolosuhteet. /12/

Aaltovoimateknologia on vielä melko alkutekijöissä, mutta sitä kehitetään jatkuvasti erilaisten hankkeiden myötä. /11/

### 3.3 Ydinenergia

Ydinvoimateknologiassa voimalaitoksen ydinreaktorissa olevia uraanin atomeita halkaistaan pommittamalla niitä atomiytimien neutroneilla. Uraaniatomien halkaisussa vapautuu energiaa, joka muuttuu lämmöksi. Vapautuneella lämmöllä muodostetaan korkeapaineista höyryä, joka pyörittää turbiinia.

Ydinvoima ei tuota lainkaan hiilidioksidipäästöjä, ja on tämän vuoksi yksi ratkaisusta ilmastonmuutoksen torjumiseen. Asiaa puoltavat vielä laajat uraanivarannot maapallolla. Ydinvoimateknologialla on myös omat varjopuolensa. Uraanin louhinta tuottaa radioaktiivista jätettä ja voimalaitokseen liittyy aina ydinonnettomuusriski. Energian tuotannon ohella ydinvoimaprosessissa syntyy ydinjätettä, joka pysyy radioaktiivisena tuhansia vuosia. Ydinjäte haudataan syviin kallioluoliin maan alle. /13/

Tällä hetkellä maailmassa on käytössä 435 ydinvoimalaa 30 eri maassa, joiden energiantuotanto on 370 000MW. Voimalat kattavat maapallon energiantuotannosta 16 %, ja luku on jatkuvassa nousussa, hyötysuhteen paranemisen ja uusien voimaloiden seurauksena. /14/

## 4 HIILIDIOKSIDIN EROTUS JA TALTEENOTTOMENETELMÄT

Idea hiilidioksidin erotuksesta ja talteenotosta ei varsinaisesti käynnistynyt kasvihuoneilmiön vaikutuksesta, sillä jo 1970-luvulla talteenottoa on sovellettu öljyteollisuudessa, jossa hiilidioksidia ruiskutettiin öljysäiliöihin, parantaen öljyn liikkuvuutta /15/. Talteenotto ja varastointi ovat varsin uutta energiantuotannossa ja teollisuudessa, jossa ne kasvavat kovaa vauhtia. Maakaasun tuotannossa ja kemianteollisuudessa talteenottoprosessia on sovellettu kuitenkin jo yli 60 vuotta /16/.

Hiilidioksidin erotuksen hinta määräytyy lähinnä neljästä osasta:

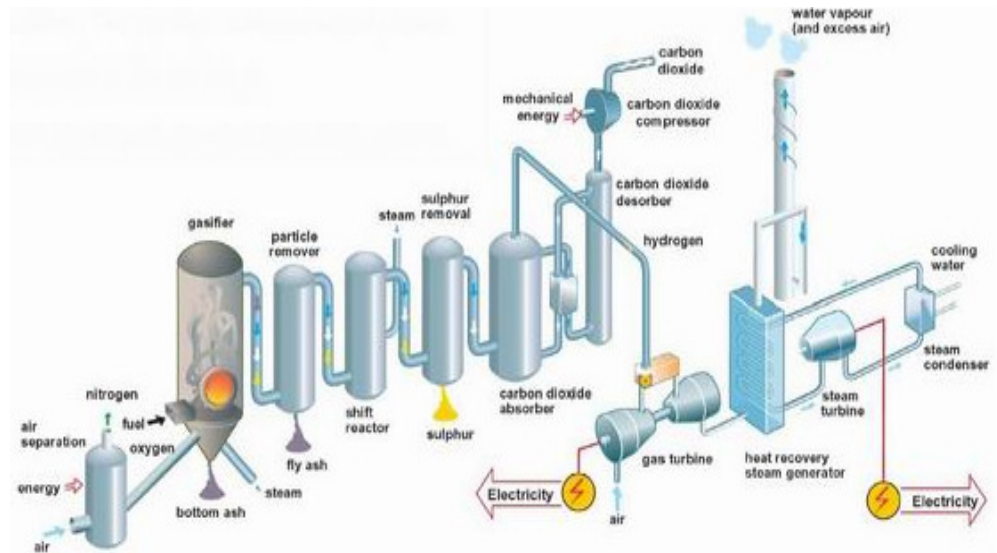
1. erotuksesta
2. kokoonpuristuksesta
3. putkijohdotuksesta/siirrosta
4. ruiskutuksesta.

Erotuskustannukset vaihtelevat 35–70 \$ /CO<sub>2</sub> t riippuen menetelmästä, jolla hiilidioksidi erotetaan.

Ennen puristusta hiilidioksidi erotetaan ja puhdistetaan, jonka jälkeen puristetaan 13.8 MPa paineeseen. Puristuksen jälkeen hiilidioksidi ohjataan putkistoon, jossa on paineenalennusasemia/jäähdytysasemia. Puristuksen hinta vaihtelee 8–10 \$ / CO<sub>2</sub> t. /16/

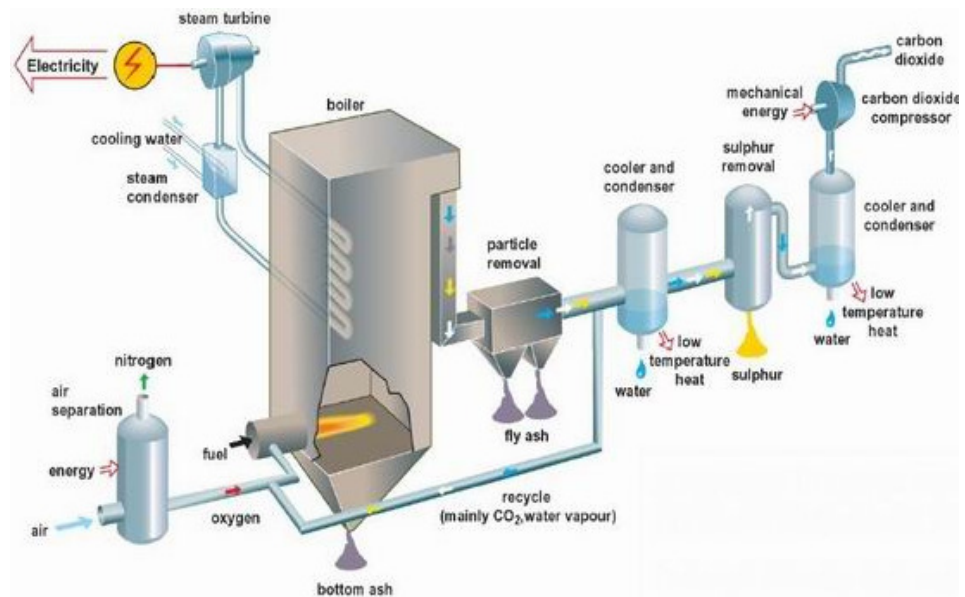
Hiilidioksidin siirto tapahtuu putkistossa. Putkiston rakenne on sama, kun maakaasun jakelussa. Siirron kustannukset vaihtelevat 0,7–4 \$ / CO<sub>2</sub>t / 100 km. Yleisimmät ongelmat koskien siirtoa ovat putkiston korroosio ja kaasuneste seoksen kaksifaasivirtaus. Hiilidioksidin erotus voimalaitoksista voidaan jakaa kolmeen pääryhmään:

1. Talteenotto ennen polttoa (kuva 5)
2. rikastettu happipoltto (kuva 6)
3. jälkipolttotalteenotto (kuva 7). /15/

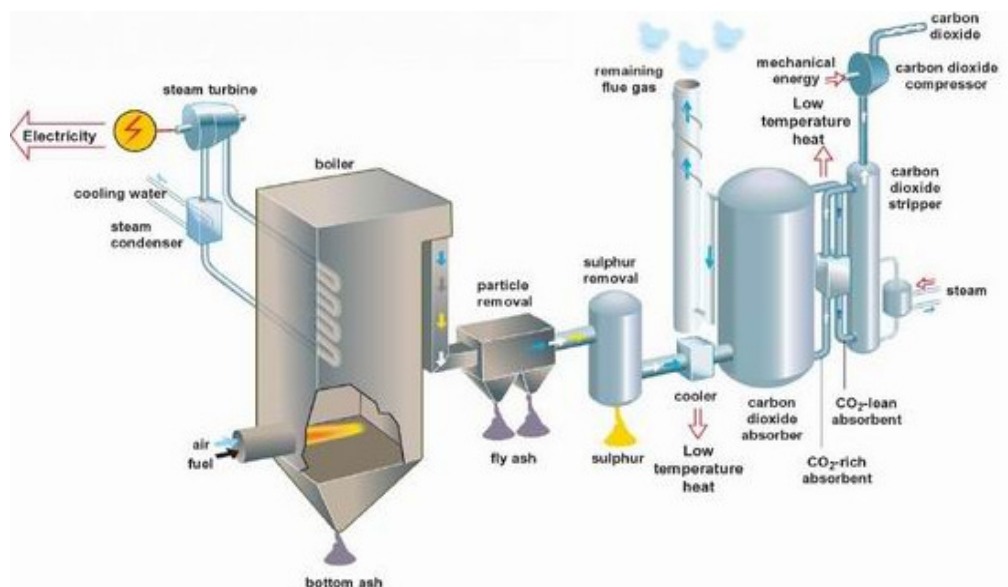


Kuva 5. Talteenotto ennen polttoa /18/.





Kuva 6. Rikastettu happipoltto -menetelmä /18/.

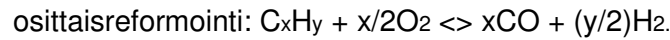
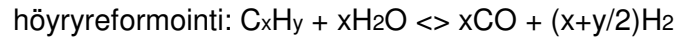


Kuva 7. Jälkipolttotalteenotto /18/.

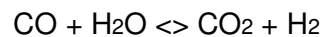
#### 4.1 Talteenotto ennen polttoa

Talteenotto ennen polttoa koostuu hapen ja hiilimonoksidin tuottamisesta käytettävästä polttoaineesta, joka yleisesti on hiili. Prosessin kaksi päävaihetta ovat höyryn tai hapen syöttäminen polttoaineeseen. Höyryä syötettä-

essä prosessia kutsutaan höyryreformoinniksi ja happea syötettäessä osittaisreformoinniksi. Prosessissa tapahtuu seuraavat kemialliset reaktiot:

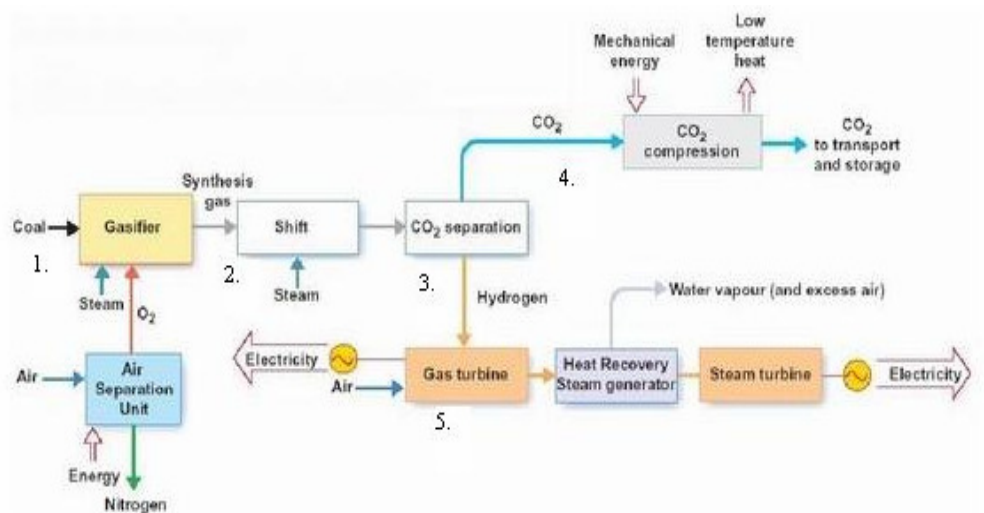


Reaktioita seuraa tämän jälkeen muunnosreaktio, josta seuraa hiilimonoksidin muuntaminen hiilidioksidiksi.



Hiilidioksidin erotuskyky vaihtelee välillä 15–60 %.

Polttoaine ja happi syötetään kaasuttimeen, jossa ne kaasuuntuvat, ja tässä vaiheessa poistetaan myös ylimääräinen kuona-aines ja rikki. Kaasut reagoivat joko hapen tai höyryn kanssa, jotta saadaan tuotettua hiilimonoksidia ja vetyä. Tuotettu hiilimonoksidi reagoi katalyyttisessä reaktorissa vesihöyryn kanssa, jolloin tuotetaan hiilidioksidia ja vetyä. Hiilidioksidi erotetaan ja vety voidaan käyttää polttoaineena kaasuturbiinissa, jolloin päästöjä ei synny muita kuin typpeä, happidioksidia ja vesihöyryä (kuva 8). Teknologiaa käytetään myös mm. ammoniakkin valmistuksessa. /17/

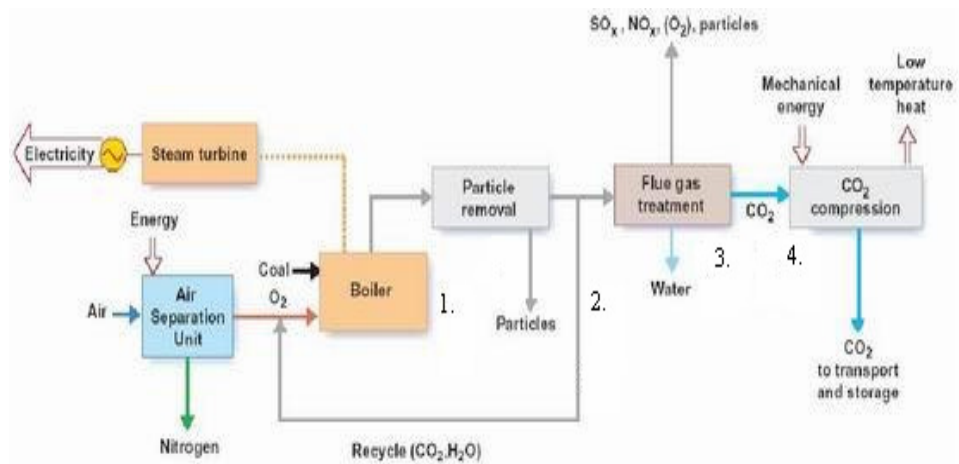


Kuva 8. Talteenotto ennen polttoa: 1. Kaasutin. 2. Kaasun puhdistus sekä hiilimonoksidin ja vedyn tuotto. 3. Hiilidioksidin erotus. 4. Hiilidioksidin puristus 5. Kaasuturbiini /18/.

## 4.2 Rikastettu happipoltto

Happi- ja hiilidioksidipoltossa käytetään lähes puhdasta rikastettua happea normaalin ilman sijasta (kuva 9). Käytettäessä puhdasta rikastettua happea nousevat palolämpötilat lähes 3500 celsiusasteeseen. Tämän suuruiset lämpötilat ovat liian korkeita tyypillisille voimalaitoksissa käytössä oleville materiaaleille. Lämpötilahuippuja kontrolloidaan kierrättämällä savukaasuja polttokammion, jolloin päästään noin 1900 celsiusasteen lämpötilaan. Menetelmä tuottaa lähes 75 % vähemmän palokaasuja normaaliin happipoltoon verrattaessa. Palokaasut sisältävät pääosin hiilidioksidia ja vettä, sekä vain muutamia prosentteja typpeä ja rikkidioksidia. Menetelmää käytetään, jotta sähköntuotannon ohella saadaan tuotettua hiilidioksidipitoisia kaasuja, jotka erotetaan ja varastoidaan.

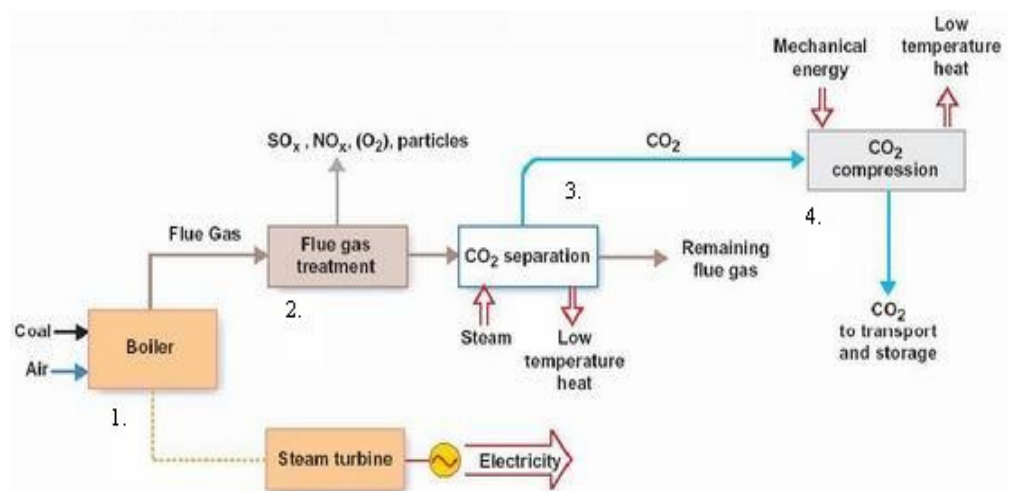
Teollisuudessa, kuten raudan, alumiinin ja lasinsulatuksessa käytetään paljon edellä olevaa menetelmää sen suuren palolämpötilan vuoksi. Rikastetun hapen valmistaminen on kuitenkin taloudellisesti hyvin kallista, joten tämän vuoksi se ei vielä ole taloudellisesti kannattavaa energiantuotannossa ja hiilidioksidin erotuksessa. /19/



Kuva 9. Rikastettu happipoltto: 1. Kattila. 3. Savukaasujen kierrätys polttokammion. 3. Savukaasujen puhdistus(CO<sub>2</sub> erotus). 4. Hiilidioksidin puristus. /19/.

### 4.3 Jälkipolttotalteenotto

Jälkipolttotalteenotolla tarkoitetaan prosessia, jossa hiilidioksidi talteen otetaan vasta polttoprosessin jälkeen (kuva 10). Tavanomaiset prosessikuumennimet, kombivoimalaitosprosessit ja teollisuuskattilat kuuluvat jälkipolttotalteenottoon, joka on yleisin käytössä oleva prosessimenetelmä. Näissä prosesseissa fossiiliset polttoaineet poltetaan esikuumennetun ilman avulla. Tämän ansiosta saavutetaan savukaasuvirtaus, joka sisältää laihaa seosta hiilidioksidia. /17/



Kuva 10. Jälkipolttotalteenotto: 1. Kattila. 2. Savukaasun puhdistus. 3. Hiilidioksidin erotus. 4. Hiilidioksidin puristus. /18/.

### 4.4 Hiilidioksidin talteenottomenetelmät polton jälkeisistä savukaasuista

Hiilidioksidin talteenottomenetelmät voidaan jaotella prosessien ohella seuraavasti:

1. absorptiomenetelmä (kemiallinen ja fysikaalinen)
2. adsorptiomenetelmä
3. kryogeeninen absorptiomenetelmä
4. membraanimenetelmä
5. muut menetelmät. /15/

#### 4.4.1 Absorptiomenetelmä

Tutkimukset ja kokeet ovat osoittaneet, että kemiallisten liuotteiden käyttöön perustuva absorptioprosessi on osoittautunut parhaaksi tavaksi hiilidioksidin erotukseen. Menetelmän hyviä puolia ovat vähäinen energiankäyttö sekä korkea hiilidioksidin erotuskyky. Tämä sopii parhaiten kaasuille, joiden hiilidioksidipitoisuus tilavuusyksikköä kohden on 5–15 %. Hiilidioksidin erotukseen käytetään alkaaniamineita, jotka voidaan jakaa kolmeen ryhmään:

1. monoetanoli-amiini ja diglykoli amiini
2. di-etanoliamiini ja di-isopropyliamiini
3. trietanoliamiini ja mentyyli-dietanoliamiini. /16/

#### Kemiallinen absorptiomenetelmä

Kemiallinen absorptiomenetelmä (kuva 11) voidaan jakaa kahteen eri vaiheeseen:

1. CO<sub>2</sub>- absorptio käyttäen kemiallisia liuotteita matalassa lämpötilassa (40–65 °C),
2. hiilidioksidin erottaminen liuottimista, käyttäen voimalaitoksilta saatua heikkoarvoista lämpöä (100–150 °C).

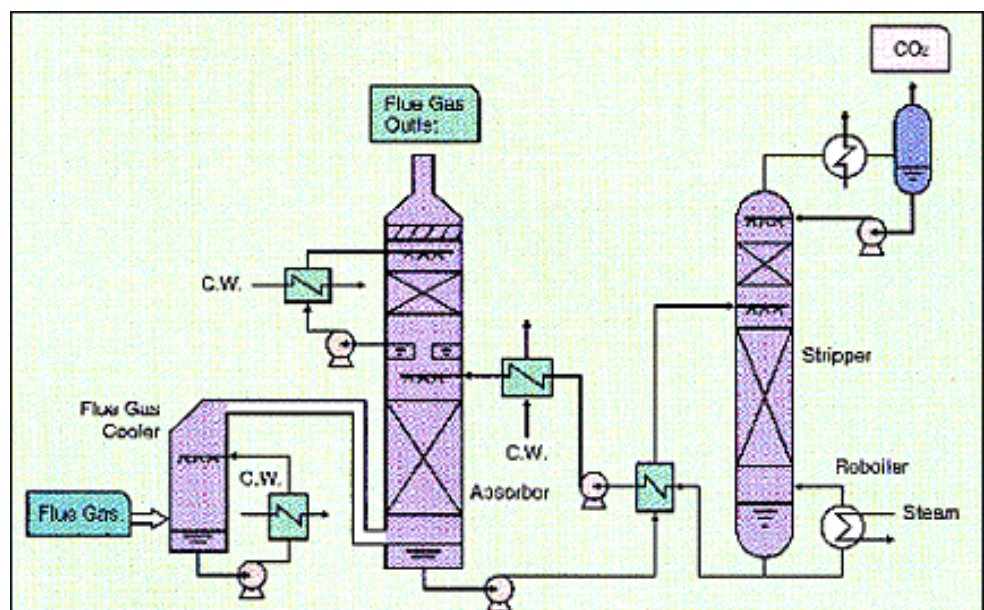
Voimalaitokselta tulevat jäähdytetyt hiilidioksidia sisältävät savukaasut reagoivat amiiniliuoksen kanssa, yleensä absorptiotornissa ja yhden baarin paineessa. Kaasuseos jäähdytetään 40–60 celsiusasteen välille ja puristetaan 1,3 baarin paineen alenemien välttämiseksi. Puristuksen jälkeen kaasut ohjataan absorptiokolonniin, missä suurin osa hiilidioksidista sitoutuu liuokseen kemiallisesti ja savukaasut ohjataan vesipesun kautta ilmakehään. Rikas liuos, johon hiilidioksidi on kemiallisesti sitoutunut, pumpataan erotinsäiliöön lämmönsiirtimen kautta. Erottimessa tapahtuu kemiallisen muunnosreaktio, korkeassa lämpötilassa (100–140 celsiusastetta) ja ilmakehän paineessa. Lämpöä kierrätetään esikuumentimen kautta, josta seuraa liuoksen kuumentaminen, höyryn tuotto (höyry toimii erotinkaasuna) ja edellytykset liuokseen sitoutuneen hiilidioksidin erotukseen. Tuotettu höyry kierrätetään lauhduttimen kautta takaisin erottimeen, kun taas hiilidioksidia sisältävä kaasu poistuu erottimesta talteenottoa varten. Laiha jäljelle jäävä hiilidioksidia sisältävä

liuos pumpataan takaisin absorptiotorniin lämmönsiirtimen kautta, jotta sää-  
vutetaan absorptioprosessiin tarkoitettu lämpötila. /17/

Prosessissa on kaksi energiaan liittyvää vaatimusta.

1. Tarvitun lämpömäärän tulee olla 4 MJ/kg uudistettua hiilidioksidia kohti, joka on tuotettu matalapaineisesta höyrystä voimalaitoksella. Regeneroituvan seoksen lämpötilan tulee olla lämpötilaltaan 150 °C, näin ollen höyryn erotus tapahtuu 5 baarissa.
2. Savukaasujen puristukseen ja amiiniliuoksen pumppaukseen tarvittava energia määrä on 0,11 MJ/kg uudistettua hiilidioksidia kohti.

Savukaasuista poistetun hiilidioksidin määrä riippuu absorptio laitteen koosta ja savukaasujen sisältämän hiilidioksidin konsentraatiosta. /20/



Kuva 11. Kemiallinen absorptiomenetelmä /21/.

### Fysikaalinen absorptiomenetelmä

Fysikaalisessa absorptiossa hiilidioksidi imeytyy liuokseen Henryn lain mukaisesti. Tämä tarkoittaa, että seos on paine- ja lämpötilariippuvainen imeytymisen kannalta, joka tapahtuu osittain korkeissa hiilidioksidin paineissa ja

matalissa lämpötiloissa. Hyöty on vähäisessä energiantarpeessa, mutta hiilidioksidin osapaineen on oltava korkea. Menetelmää sopii hiilidioksidin erotukseen yhdistetyssä lämmön- ja sähköntuotantolaitoksissa, jossa poistokaasujen hiilidioksidi on korkeapaineista. Tyypillisiä liuottimia ovat dimetyleenieetteri (Selexol) ja metanoli (Rektisol).

Selexolia on käytetty 1970-luvulta lähtien maakaasuun pehmennykseen sekä kiinteän hiilidioksidin ja rikkivedyn erotukseen.

Rektisolia käytetään lähinnä synteettisten kaasujen käsittelyssä mm. vety-sulfidin ja hiilidioksidin erotuksessa. /16/

#### 4.4.2 Adsorptiomenetelmä

Adsorptiolla tarkoitetaan ohuen kaasu- tai nestekerroksen kiinnittymistä/tarttumista kiinteälle pinnalle. Adsorptiomenetelmässä kaasujen molekyylien väliset voimat ja materiaalin kiinteä pinta mahdollistavat mm. hiilidioksidin erotuksen. Kaasujen adsorptoituminen riippuu lämpötilasta, kaasuseoksen osapaineesta, molekyylien välisistä pintavoimista ja adsorbentin huokosten koosta. Kiinteät adsorbentit, kuten aktiivihiili ja zeoliitti ovat normaalisti järjestäytyneet pallomaisiksi pedeiksi. Itse prosessi perustuu toistuvaan kiertoon, jossa adsorboitumisvaiheessa kaasu ohjataan ns. keräimeen, joka sisältää hiilidioksidia adsorboivia kiintoaineita päästään kuitenkin kaasun ja sen muut ainesosat lävitseen. /17/

Adsorptiomenetelmät voidaan jakaa kolmeen eri menetelmään:

1. adsorptiomenetelmä painetta muuntamalla (PSA-menetelmä)
  - prosessissa adsorbentti regeneroidaan painetta muuntamalla
2. adsorptio lämpötilaa muuntamalla (TSA-menetelmä)
  - prosessissa adsorbentti regeneroidaan lämpötilaa muuntamalla
3. adsorptiomenetelmä sähkövastusta muuttamalla
  - prosessissa adsorbentti regeneroidaan, johdattamalla matalavirtaista sähköä adsorbentin läpi.

Adsorptiomenetelmää ei ole vielä harkittu kiinnostavaksi laajamittaisessa hiilidioksidin erotuksessa palamiskaasuista, sillä hiilidioksidin selektiivisyys ja kapasitiivisyys käytettävistä adsorbentista on matala. /17/

### *PSA-menetelmä*

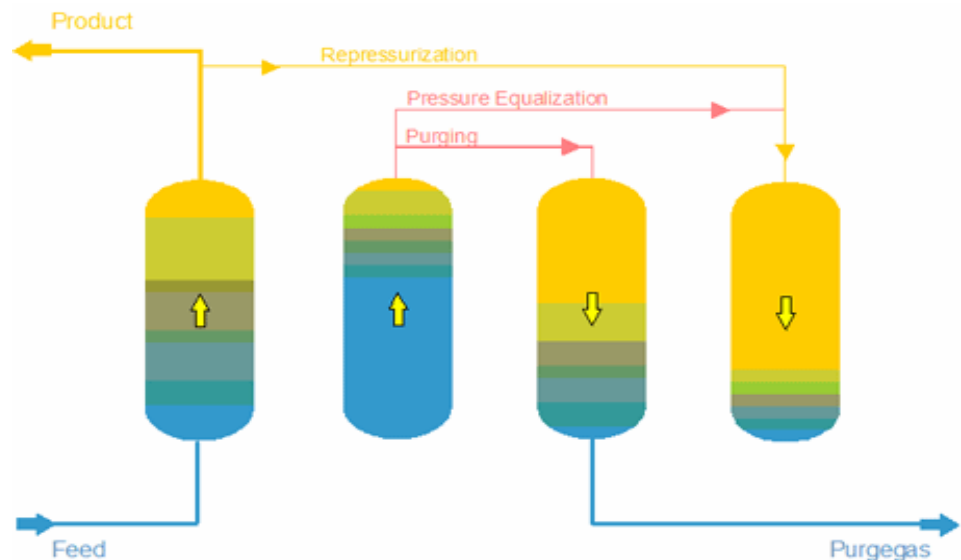
PSA-menetelmä on adsorptiomenetelmistä yleisesti käytetyin, ja menetelmää käytetään enimmäkseen vedyn puhdistamisessa kaasuista sekä hiilidioksidin erotuksessa. Erotinyksikkö koostuu useista säiliöistä, jotka sisältävät adsorboivia kerroksia. Adsorboivina aineina käytetään aktiivihiihtä, piihappogeeliä, alumiinioksidia ja zeoliittia. Jokaisessa säiliössä on oma venttiilinsä, joka kontrolloi kaasun virtausta. Venttiilit ovat yhteydessä toisiinsa, joten kaasun annostelu säiliöiden välillä toimii katkottomasti ja syöttö on näin ollen jatkuvaa. Itse menetelmä voidaan jakaa viiteen perusvaiheeseen:

- adsorptio
- myötävirta paineenalennus
- vastavirta paineenalennus
- puhdistus
- uudelleen paineistus.

Menetelmän tarkoitus on tuottaa puhdasta korkealaatuista vetyä jatkuvalla syötöllä (jopa 99,9 %). Kaasu syötetään säiliöön, joka sisältää adsorboivaa ainetta. Epäpuhtaudet, kuten hiilidioksidi tarttuvat adsorboivaan ainekseen ja jäävät säiliön alaosaan. Puhdas vety ohjataan samalla viereiseen säiliöön, jossa paine kasvaa ja vastaavasti syötetyn säiliön paine laskee. Tarkoituksena on tasapainottaa säiliöiden paineita, jolloin myös vedyn laatu paranee. Säiliön ollessa täynnä epäpuhtauksia, regeneroidaan adsorbentti. Poisto-kaasun venttiili aukaistaan säiliön pohjasta, jolloin paine laskee ja epäpuhtaudet kerätään pois (kuva 12).

Menetelmän jatkuva kierto perustuu kaasujen ohjaukseen ja tämän avulla paineiden ylläpitämiseen. Toiminnan varmistamiseksi on prosessissa oltava aina vähintään kaksi säiliötä käytössä. /22/





Kuva 12. Adsorptiomenetelmä painetta muuntamalla /23/.

#### ESA- ja TSA-menetelmä

ESA- ja TSA-menetelmät ovat vielä kehitysvaiheessa, mutta näillä on lupaavat markkinat ajatellen kehittyntä hiilidioksidin erotusta pienten energian kulutuksien kannalta /17/.

#### 4.4.3 Kryogeeninen menetelmä

Kryogeeninen erotusmenetelmä tunnetaan myös nimellä matalalämpötila-erotus. Menetelmää käytetään hiilidioksidin puhdistukseen ja nesteytykseen kaasuissa, joiden hiilidioksidipitoisuus konsentraatio on suurempi kuin 50 %. Kaasut jäähdytetään hyvin alhaiseen lämpötilaan, jonka seurauksena hiilidioksidi saadaan nesteytettyä ja eroteltua. Kryogeenisen menetelmän edut ovat, että se mahdollistaa suoran nestemäisen hiilidioksidin tuoton ja näin ollen taloudellisen kuljetuksen ja jakelun. Haittapuolia taas ovat menetelmän korkea energiankulutus ja hinta. /16/

#### 4.4.4 Membraanimenetelmä

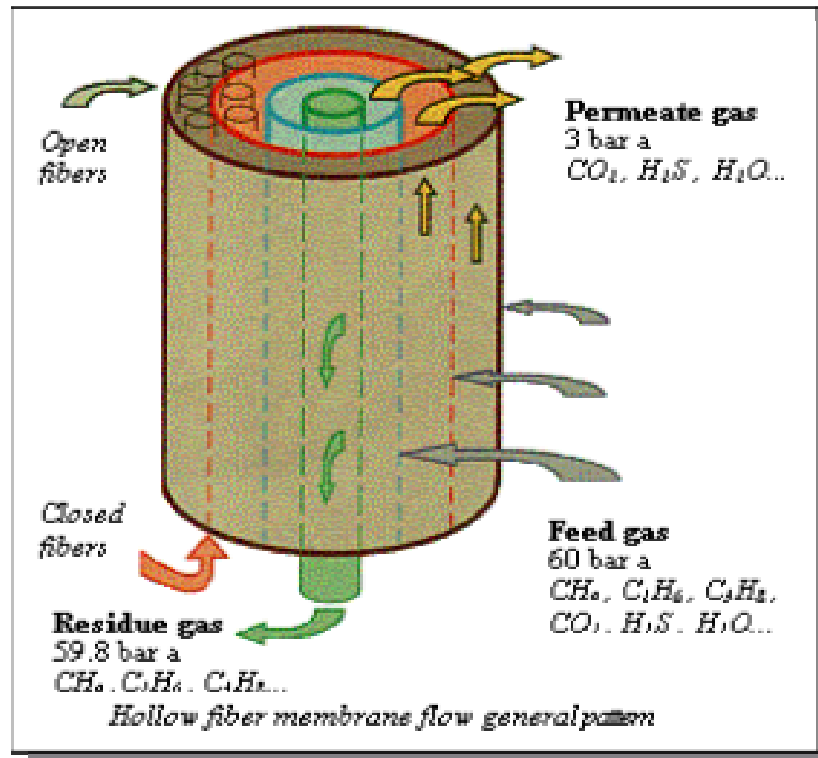
Membraanilla tarkoitetaan ohutta puoliläpäisevää kalvoa, joka selektiivisesti erottaa yhdisteitä toisistaan. Laajaa määritelmää on välttämätöntä käyttää johtuen erilaisista materiaaleista. Kaasujen erotuksessa kyseiset kalvot ovat yleensä muodostuneet ontelomaisiksi säikeiksi, järjestäytyen putki- ja kuori-

muodostelmiksi tai ohuiksi kalvoiksi. Vedyn erotukseen membraani menetelmää on käytetty laajasti. /15/

Yleisesti käytössä olevat kalvot hiilidioksidin erotuksessa on pääosin valmistettu selluloosa-asetaatista, polysulfonista ja polyamidista (kuva 13). Hiilidioksidin erotus maakaasusta perustuu selektiiviseen läpäisyyn onttokuituisen kalvon läpi. Vaadittava pakotevoima saavutetaan kalvossa olevan osapaine-eron avulla. Hiilidioksidi toimii nopeana kaasuna, kun taas metaani on hidas kaasu. Paineistettu kaasu ohjataan nipun sisälle vaipan puolelta, metaani pysyy paineisena, ja matalapaineisempi hiilidioksidi kerätään talteen. Matalassa paineessa oleva hiilidioksidi tarvitsee lisäpuristusta, jotta se voidaan ohjata putkistoon. /24/

Hiilidioksidin erotuskyky vaihtelee välillä 20–40 %, riippuen lämpötilasta. Jotta menetelmästä saadaan taloudellisesti kannattavaa ja tehokasta, vaatii se jonkin verran kehitystä. Absorptiomenetelmään verrattaessa menetelmällä saavutetaan kuitenkin seuraavia etuja:

- menetelmä ei tarvitse erillistä erotinainesosaa eikä regenerointia
- menetelmä on kompakti ja kevyt
- matalat ylläpitokustannukset, sillä menetelmä ei sisällä liikkuvia kuluvia osia. /16/



Kuva 13. Membraanierotin /24/.

#### Yhdistetty amiini- membraanimenetelmä (uusi teknologia)

Amiiniprosessin ja membraanimenetelmän kytkeminen toisiinsa samanaikaisesti luo mahdollisuuden muodostaa yhdistetyn prosessin hiilidioksidin talteenotolle palokaasuista. Mikrohuokoiset onttokuituiset kalvot ovat nousemassa suosioon hiilidioksidin erotuksessa pohjautuen kemialliseen absorptiomenetelmään. Mikrohuokoisia kalvoja käytetään kaasunesteyksiköissä, joissa amiiniliuos on kosketuksessa hiilidioksidia sisältävän kaasun kanssa. Toisin kuin perinteisissä membraanierottimissa yhdistetyn menetelmän toiminta perustuu käänteiseen kemialliseen reaktioon, mutta massan vaihto tapahtuu uuttamalla kaasun kalvon lävitse aivan kuten tavanomaisessakin menetelmässä.

Onttokuituinen kalvo itsessään ei osallistu erotukseen, mutta sen sijaan toimii kosketusaineena kaasun ja nesteen välillä. Kaasunestekalvokoskettimien käytön hyötyjä ovat:

- Korkea kaasu- nestekosketusalue onttojen kuitujen suuren pakkaus- tiheyden ansiosta.
- Kaasuvirtaus ei vaikuta liuottimeen eikä nesteessä ole kaasua sito- vaa hajaantumista. Näiden avulla on estetty vaahtoutuminen.
- Membraani toimii erottimena kaasun ja nesteen välillä. Kaasu- nes- teen virtausnopeus vaihtelee laajalti aiheuttamatta kuitenkaan vir- tausongelmia.
- Käytössä oleva kaasun ja nesteen kosketusala ei häiriinny virtausno- peuksien vaihtelusta, ja tämän ansiosta prosessi sietää suuriakin vaihteluita.
- Liuoksen heikentymistä voidaan vähentää estämällä hapen pääsyä kosketuksiin liuottimen kanssa. /17/

#### 4.5 Muita hiilidioksidin talteenottomenetelmiä

Tässä luvussa käsitellään uusia ajatuksia ja menetelmiä, joiden avulla on tarkoitus parantaa voimalaitoksen hyötysuhdetta sekä pienentää hiilidioksi- din talteenotosta johtuvia kustannuksia. Menetelmät, jotka ovat kehitystulos- ten ja tulevaisuuden kannalta tärkeimmät ovat:

- kemiallinen silmukkapoltto
- polttokennot
- kuiva regeneroiva absorptiomenetelmä. /25/

##### 4.5.1 Kemiallinen kiertopoltto

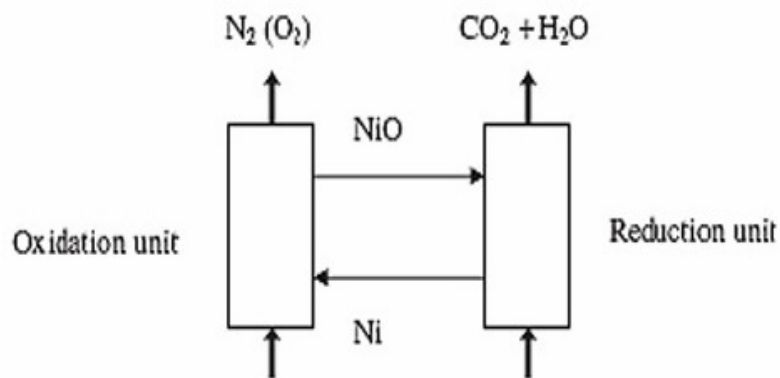
Kemiallinen silmukkapoltto on epäsuora polttomenetelmä. Tässä polttoaine reagoi ensimmäiseksi hapenkantimen kanssa. Hapenkannin kuljettaa ensiksi happea ilmasta polttoaineelle ja polttotapahtuman jälkeen polttoaineesta va- pautuvan kemiallisen energian. Menetelmä voidaan jakaa kahteen reaktio- vaiheeseen, jotka tapahtuvat omissa reaktoreissaan. Reaktorit jaetaan pel- kistin (polttoainereaktori)- ja hapetinreaktoreihin.

Pelkistysreaktorissa hapenkannin oksidoi polttoaineen, minkä seurauksena vapautuva energia varastoituu pelkistyneeseen metallioksidisiin. Pelkistynyt

metallioksidi siirtyy hapetinreaktoriin, jossa se uudelleen hapetetaan ilman avulla ja varastoitunut energia vapautuu reaktoriin. Sama metallioksidi kiertetään takaisin pelkistinreaktoriin, ja näin ollen kierto on toistuvaa.

Hapenkantimina käytetään metallioksideoja, joiden reaktiokykyä ja lujuutta on parannettu kemiallisilla yhdisteillä. Hapenkantimilla tulee olla seuraavat kriteerit, jotta niitä voidaan käyttää:

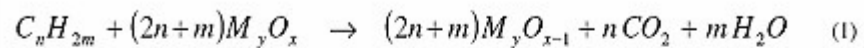
- kapasiteetti hapen siirtoon tulee olla riittävä
- korkea mekaanisen rasituksen sietokyky
- edullisuus. /25/



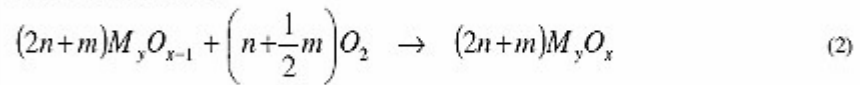
Kuva 14. Kemiallinen kiertopoltto menetelmä /25/.

Kuvasta 14 näkee, että reaktoreissa palamisesta syntyneet tuotteet ovat erotettu kahteen virtaukseen. Pelkistysreaktorista vapautuva savukaasuvirta sisältää ainoastaan hiilidioksidia sekä vettä ja hapetinreaktorista vapautuu typpeä ja happea. Vesihöyry on yksinkertaista erottaa ja näin ollen hiilidioksidi saadaan erotettua huomattavasti pienemmällä energian häviöllä ja kustannuksilla, ja reaktiosta vapautunut typpi voidaan käyttää kaasuturbiinissa polttoaineena. Kuvassa 15 selviää menetelmässä tapahtuvat kemialliset reaktiot, ja kuvassa 16 menetelmä yhdistettynä kaasuturbiiniprosessiin. /25/

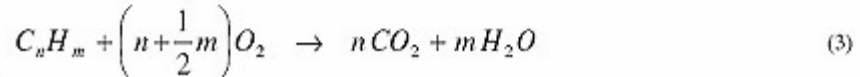
The reduction reaction,



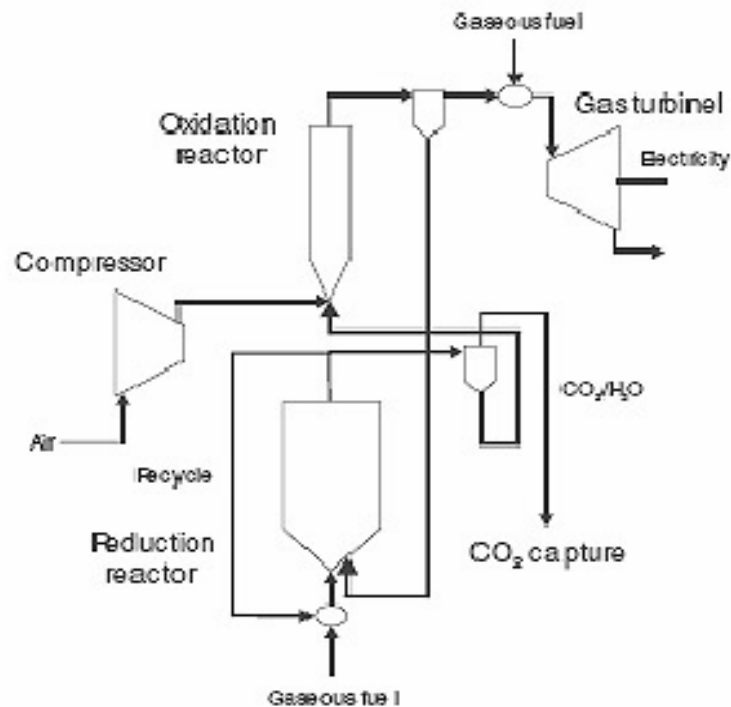
The oxidation reaction,



The overall reaction,



Kuva 15. Kemiallisessa kiertopolttomenetelmässä tapahtuvat reaktiot /25/.



Kuva 16. CLC menetelmä kaasuturbiiniprosessissa /25/.

#### 4.5.2 Polttokennot

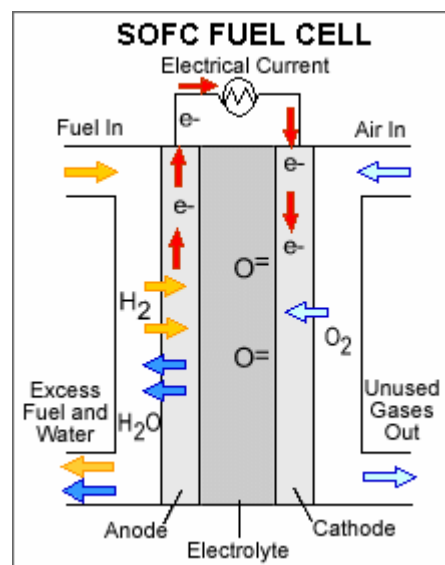
Polttokennojen hyötynä on polttoaineen ja sen oksidien pysyminen irrallaan hapettimesta hapetuksen aikana. Korkealämpötilapolttokennossa happi tuodaan sisään kennoon katodipuolelta ja ohjataan anodipuolelle. Katodipuolta kutsutaan ilmapuoleksi ja anodipuolta polttoainepuoleksi. Anodilta muodos-

tunut kaasu sisältää ainoastaan vesihöyryä ja hiilidioksidia (ilmalla laimentamatonta). Polttoainenipussa osa polttoaineesta jää konvertoitumatta, ja tämän vuoksi jäljelle jäävä hiilidioksidi on joko erotettava polttoaineesta tai polttoaine on hävitettävä kokonaan.

Uuden tekniikan ansiosta perusprosessin pakokaasuvirran yhteyteen voidaan yhdistää membraani reaktiomenetelmä. Teknologian etu on, että jäljelle jäävä reagoimaton polttoaine joko hapetetaan tai siitä erotetaan typpi. Polttokennot voidaan jakaa matalalämpötilapolttokennoihin ja korkealämpötilapolttokennoihin.

Tyypillisiä matalalämpötila polttokennoja ovat PEM- ja PAFC-kennot. Nämä polttokennot toimivat ainoastaan reformoidun polttoaineen kanssa, sillä ne ovat epäherkkiä hiilidioksidille, mutta herkkiä hiilimonoksidille. Hiilimonoksidi on reformoinnilla muunnettava hiilidioksidiksi, jotta päästään onnistuvaan hiilidioksidin talteenottoon.

Korkealämpötila polttokennot, kuten SOFC-kennot (kuva 17) ja MCFC-kennot, pystyvät muuntamaan puhdistetun synteesikaasun tai maakaasun ilman erillistä reformointia. Nämä ovat vielä kehitysvaiheessa, mutta tulevaisuudessa näiden uskotaan olevan kaasuturbiinien yhteydessä. /25/



Kuva 17. Kiinteäoksidipolttokenno /19/.

#### 4.5.3 Kuiva regeneroiva absorptiomenetelmä

Kuivaksi regeneroituvaksi absorptiomenetelmäksi kutsutaan erotusmenetelmää, jossa käytetään regeneroituvia kuivia sorbentteja. Menetelmässä hiilidioksidi adsorboituu sorbentin vaikutuksesta kemiallisesti, ja lopputuloksena saadaan vahvaa hiilidioksidia sisältävää liuosta. Sorbentti regeneroituu uudelleen, ja se ohjataan takaisin kierron alkuun. Natriumkarbonaatti, kalsiumoksidi ja litiumsilikaatti ovat antaneet jo lupaavia tuloksia erilaisissa tutkimuksissa.

Sorbentteja voidaan käyttää sekä polttoa ennen tapahtuvassa menetelmässä sekä jälkipolttotalteenottomenetelmässä. Karbonaattipohjaisen sorbentin absorptiolämpötilan tulee olla 50–60 celsiusasteen välillä, ja regeneroituminen tapahtuu tämän jälkeen lämpötilaa nostamalla. /25/

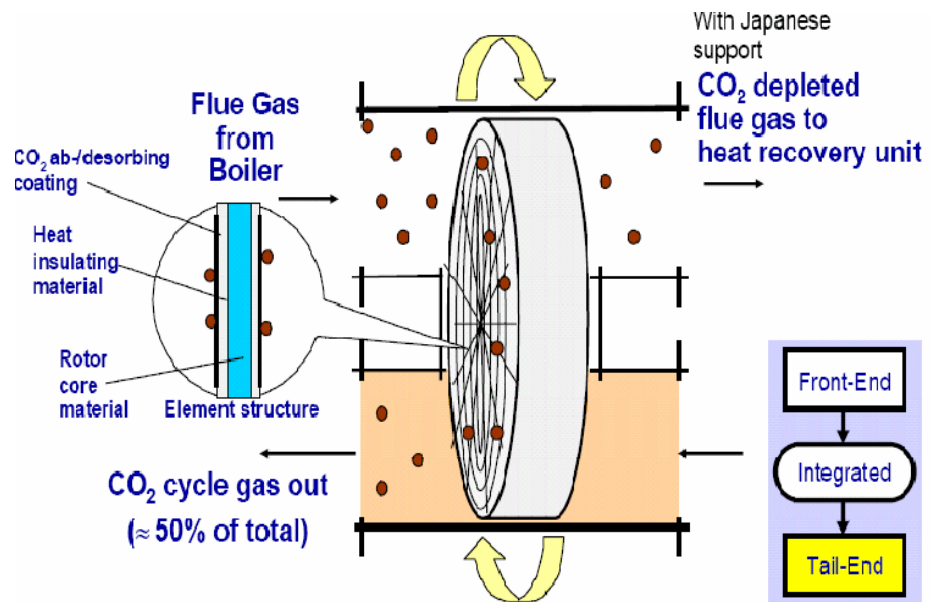
#### *Alstomin CO<sub>2</sub> erotinpyörä*

Alstom on esitellyt pyörätyyppisen hiilidioksidinerottimen, perustuen litiumsilikaattisorbentin käyttöön. Menetelmää on kehitelty Japanissa yhdessä Toshiba-konsernin kanssa (kuva 18).

Sorbenttiaines ladataan pyörivään renkaaseen, jonka läpi ohjataan tämän jälkeen savukaasuvirtaus. Renkaan saavuttaessa regenerointivöhyke ohjataan sen läpi kuuma hiilidioksidivirtaus, jotta savukaasuista absorboitunut hiilidioksidi vapautuu.

Absorbointi tapahtuu 450–700 celsiusasteen välillä ja regenerointi 700 celsiusasteessa. Sorbenttina toimivan litiumsilikaatin väitetään absorboivan hiilidioksidia 500 kertaa oman tilavuutensa verran. Menetelmällä päästään hyvin korkeaan hyötysuhteeseen, jonka vuoksi sitä kehitetään jatkuvasti. /25/





Kuva 18. Alstom-Toshiba-hiilidioksidipyörä /18/.

Renkaan yhdistäminen voimalaitokseen on oikeastaan välttämätöntä, jotta menetelmästä saadaan paras mahdollinen hyöty. Voimalaitoskäytössä korkeat toimintalämpötilat vaativat kuitenkin renkaan esilämmitystä useilla lämmönsiirtimillä. Esimerkiksi yhdistäminen 250 megawatin hiilivoimalaitokseen vaatii suuruudeltaan renkaan, jonka halkaisija on 20 metriä ja syvyys 1,5 metriä. Renkaaseen ohjattava kuuma hiilidioksidivirta tuotetaan erillisellä lämmittimellä, joka on tässä tapauksessa suuruusluokka 60–70 megawattia. /25/

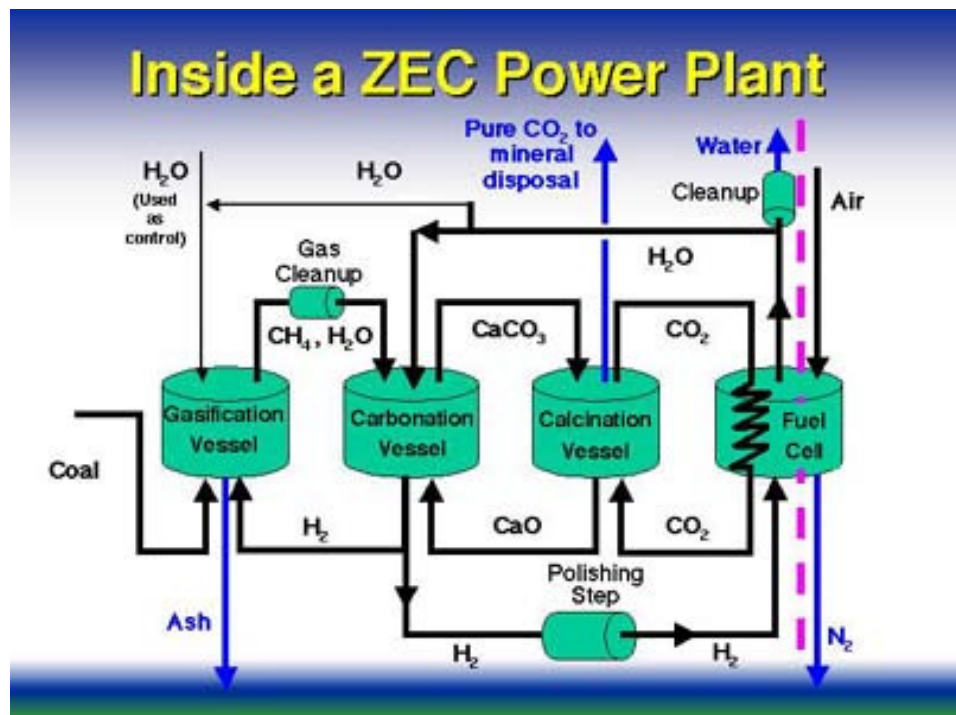
Koko yksikön yhteiskustannukset ovat noin 80 milj. \$ ja talteenottokustannukset 20 \$ / CO<sub>2</sub> t. /25/

### ZECA-prosessi

ZECA-prosessissa hiili syötetään kaasuttimeen anaerobisesti, jotta saadaan tuotettua puhdasta vetyä energian tuotantoon. Prosessi sisältää eksotermisen kaasuuntumisvaiheen, missä vetyä käytetään metaanin tuottamiseen. Tuotettu metaani reformoidaan seuraavaksi käyttämällä vesi-kalkkipohjaista sorbenttia. Sorbentin tehtävä on antaa energiaa reformointireaktiolle ja poistaa samalla muodostunutta hiilidioksidia tuottamalla kalsiumoksidia. Jäljelle jäävästä vedystä puolet ohjataan kaasuttimelle ja loput polttokennolle. Polttokennolta jäävää korkealämpötilaista hukkalämpöä käytetään kalsiumoksi-

din regeneroimiseen kalsinoimalla sitä kalsiumkarbonaatilla. Tämän tulokse-  
na saadaan puhdas hiilidioksidia sisältävä virtaus (kuva 19).

Prosessia on testattu vasta pienimuotoisissa koelaitoksissa. Näissä ongel-  
miksi on osoittautunut eri prosessien yhdistymisvaiheet ja lämpötilojen vaih-  
telut. Korkeat lämpötilat aiheuttavat ongelmia materiaaleissa mm. säiliöissä.  
/25/



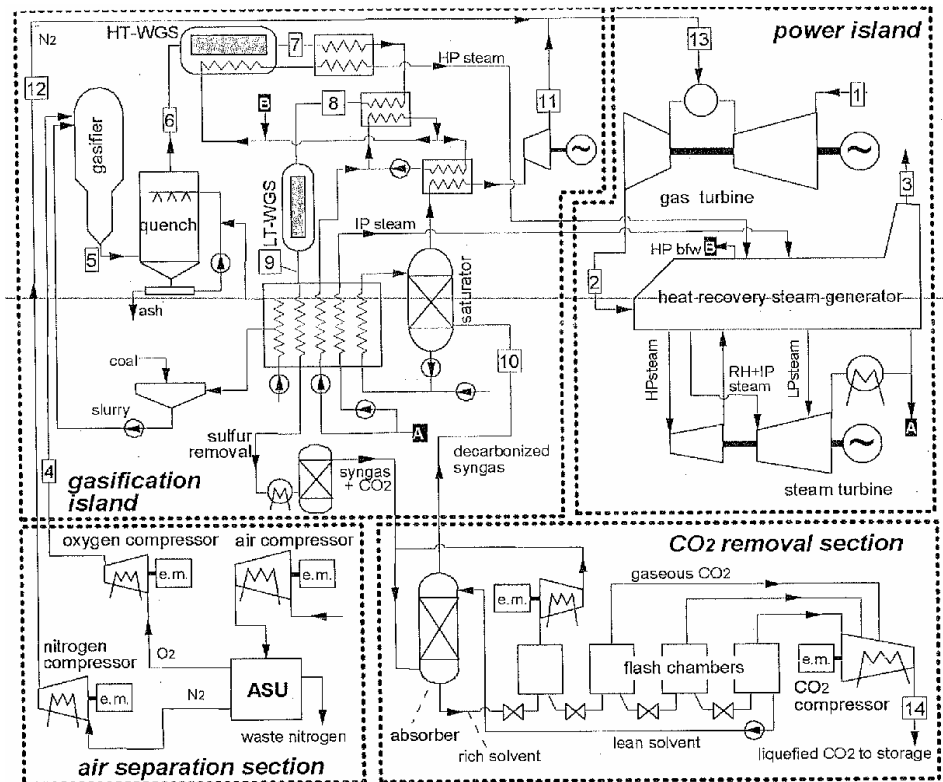
Kuva 19. ZECA-prosessi /26/.

#### 4.6 IGCC-voimalaitos

Kuvassa 20 on esitetty kaaviokuva hiilidioksidin talteenotosta IGCC voima-  
laitoksessa. IGCC on lyhenne sanoista Intergrated Gasification Combined  
Cylcle. Tämä tarkoittaa yhdistettyä sähkön- ja lämmöntuotantolaitosta.

Polttoaineena on hiili, joka syötetään kaasuttimeen. Kaasuttimessa tapahtuu  
kaasuuntuminen ja kuumien synteesikaasujen vapautuminen. Kuumat syn-  
teesikaasut jäähdytetään vesijäähdyttimessä suoralla kosketuksella ja myös  
ylimääräinen tuhka poistetaan tässä vaiheessa. Vesijäähdyttimeltä kaasut  
ohjataan korkealämpötilaiseen rikkiä sietävään lämmönsiirtimeen, missä

kaasujen lämpötila nousee 400 celsiusasteeseen eksotermisen reaktion johdosta. Vapautuvalla lämmöllä tuotetaan korkeapaineista kylläistä höyryä, joka ohjataan höyrykehittimelle tai höyryturbiinille. Tämän jälkeen kaasut jäähdytetään lämmittämällä kaasuturbiinin polttoainetta ja korkeapaineekattilan syöttöväettä. /27/



Kuva 20. IGCC voimalaitoksen kaaviokuva /27/.

Kondensoituneen veden erotuksen jälkeen kaasut siirtyvät matalapaineiseen vesi-kaasureaktoriin, jossa hiilimonoksidin muuntumistehokkuus lisääntyy 98 %:iin. Matalalämpötilalähteidenotto suoritetaan verkossa olevien lämmönsiirtimien avulla, jotka tuottavat 1. välipainehöyryä 2. lämmintä vettä hiilen muokkaamisen ja jäähdyttimen tarpeisiin, 3. kuumaa vettä synteesikaasujen kyllästymiseen.

Synteesikaasut läpikäyvät seoshöyryn erotuksen fysikaalisen absorptio-avulla. Erotusaineena on tavallisesti käytetty Selexolia. /27/

Kuvassa on rikkivedyn ja hiilidioksidin erotus kuvattu yksinkertaisuuden takia omina prosesseinaan.

## 5 HIILIDIOKSIDIN KULJETUS JA VARASTOINTI

Hiilidioksidin kuljetusmenetelmät riippuvat muutamista asioista: matkan pituudesta, paikan sijainnista ja hiilidioksidin olomuodosta. Hiilidioksidia voidaan kuljettaa kolmessa eri olomuodossa: kaasumaisessa, nestemäisessä ja kiinteässä olomuodossa. Kaasu, jota kuljetetaan ympäröivän ilmakehän paineessa, vaatii suuren tilavuuden puristettuun kaasuun verrattuna. Putkistoissa siirretään puristettua kaasumaista hiilidioksidia, kun taas kuorma-autoilla sekä laivoilla kuljetetaan nestemäistä ja kiinteää hiilidioksidia. Nesteytetyn hiilidioksidin etuja kaasumaiseen hiilidioksidiin verrattuna on sen pienempi tilavuuden tarve. Yleisimpiä kuljetusmuotoja nesteytetyn hiilidioksidin kuljetukseen ovat kuorma-autot, junat, siirtoputkistot ja laivat. /25/

### 5.1 Putkilinjastot

Yksinkertaisin ja edullisin vaihtoehto hiilidioksidin kuljetukseen on putkilinjastot. Maanpäällisessä hiilidioksidin siirtoputkistossa (kuva 21) voidaan käyttää samaa konstruktiota kuin maakaasun siirtoputkistoissa. Ennen putkistoon ohjaamista hiilidioksidi nesteytetään savukaasupesurissa ja pumpataan loppusijoituspaikkaan kaasuna, noin 8 MPa:n paineisena. Tavallisimpia ongelmia putkistoa käytettäessä ovat korroosio ja kaksifaasivirtaus. Korroosiolta vältytään, mikäli kaasun suhteellinen kosteus saadaan pidettyä alle 60 %:ssa.

Merenalaisia siirtoputkia käytettäessä putkiston rakenne ja liitokset poikkeavat maanpäällisiin putkilinjoihin verrattuna. Putkiston on kestävä suuria paineita ja ympäristövaikutuksia. Merenalaisia siirtoputkistoja on rakennettu jopa 2500 metrin syvyyteen /25/.



*Kuva 21. Hiilidioksidin maanpäällinen siirtoputkisto /28/.*

## 5.2 Kuljetus laivoilla

Hiilidioksidin kuljetus laivoilla on tietyissä tapauksissa taloudellisesti kannattavinta, mikäli kuljetusmatkat ovat pitkiä ja kuljetus tapahtuu valtamerten yli. Laivakuljetuksen etuna, putkilinjastoon verrattuna on sen joustavuus. Yhdellä tankkerilla voidaan toimittaa tuotetta useammasta lähteestä, useammille käyttäjille tai varastoihin. Samalla laivalla voi myös kuljettaa muitakin kaasuja, mikä tuokin taloudellisia etuja kuljetuksiin. Hiilidioksidia kuljettavat alukset voidaan jakaa kolmeen eri kategoriaan: painetyyppisiin aluksiin, matalalämpötilatyyppisiin aluksiin ja puolijäähdytystyyppisiin aluksiin.

Painetyypin alus on suunniteltu ehkäisemään kuljetettavan kaasun kiehumista ympärillä olevan lämpötilan johdosta, kun taas matalalämpötila tyyppisen aluksen tehtävänä on pitää alhaista lämpötilaa, jotta kaasu säilyy nestemäisessä olomuodossa. Yleisin alustyyppi on matalalämpötilatyyppin alus, sillä säiliöissä voidaan kuljettaa suuria määriä nestemäistä hiilidioksidia (kuva 22). Painetyypin aluksessa tulevat säiliöiden rasitukset vastaan, joten suurien kaasumäärien kuljetus ei ole mahdollista. Puolijäähdytetyt alukset eivät ole vielä yleistyneet, korkeiden kuljetuskustannuksien vuoksi. /25/



*Kuva 22. Nestemäistä hiilidioksidia kuljettava alus /29/.*

### **5.3 Kuljetus kuorma-autoilla**

Hiilidioksidin kuljetus maanteitse tapahtuu siihen soveltuvilla kuorma-autoilla, joissa hiilidioksidi on nestemäisenä  $-20\text{ °C}$ :n lämpötilassa ja  $2\text{ MPa}$ :n paineisenä (kuva 23). Hyviä puolia maantiekuljetuksissa ovat nopea toimitus käyttäjälle varastoihin ja joustavuus. Kovinkaan pitkiä matkoja ei kuorma-autoilla hiilidioksidia kuljeteta taloudellisista syistä. /25/



*Kuva 23. Nestemäistä hiilidioksidia kuljettava kuorma-auto /30/.*

## 5.4 Geologinen varastointi

Hiilidioksidia on varastoitu maan sisäiseen kuoreen jo useita kymmeniä vuosia. Tällä hetkellä tarkkaa määrää on vaikea arvioida, mutta puhutaan useista kymmenistä miljoonista tonneista. Nykytutkimuksissa on arvioitu, että maan kuoren alle saadaan varastoitua tuhansia gigatonneja hiilidioksidia. Hiilidioksidia voidaan varastoida geologisiin varastoihin seuraavilla menetelmillä (kuva 24):

- käytöstä poistetut öljy- ja kaasuvarastot
- syvät suolapitoiset muodostumat
- louhintaan sopimattomat hiilikerrostumat
- akviferit.

Kolmessa ensimmäisessä menetelmässä hiilidioksidi injektoidaan tiheässä muodossa maaperään, joka koostuu hiekasta, savesta ja liejusta. Tämän tyyppin maaperä pitää tai on pitänyt nesteitä sisällään, kuten öljyä, maakaasua, suolaliuoksia ja sopeutuu tämän vuoksi hiilidioksidin varastointiin. Esiintymiä on sekä maaperällä, että valtamerten pohjissa. /31/

### 5.4.1 Käytöstä poistetut öljy- ja kaasuvarastot

Hiilidioksidin varastointi käytöstä poistettuihin öljy- ja kaasukenttiin on suhteellisen luotettava ja yleinen menetelmä johtuen yksinkertaisesti muuttamisesta syistä:

- Vanhat varastot ovat luotettavia, sillä ne eivät päästäneet öljyä/kaasua lävitseen.
- Näiden geologinen rakenne ja fysikaaliset ominaisuudet tunnetaan hyvin, tutkimustulosten ja seurannan johdosta.
- Öljyn ja kaasun tuotantoa koskeva tietotekniikka on kehittynyt ja tämän avulla voidaan seurata varastoidun hiilidioksidin käyttäytymistä.

Öljyn juoksevaisuutta ja näin ollen pumppaustehon nostamista voidaan parantaa injektoimalla hiilidioksidia suoraan öljylähteeseen. Tämä lisää tavallisesti öljyn tuotantoa noin 7–15 %. /17/

#### 5.4.2 Syvät suolapitoiset muodostumat

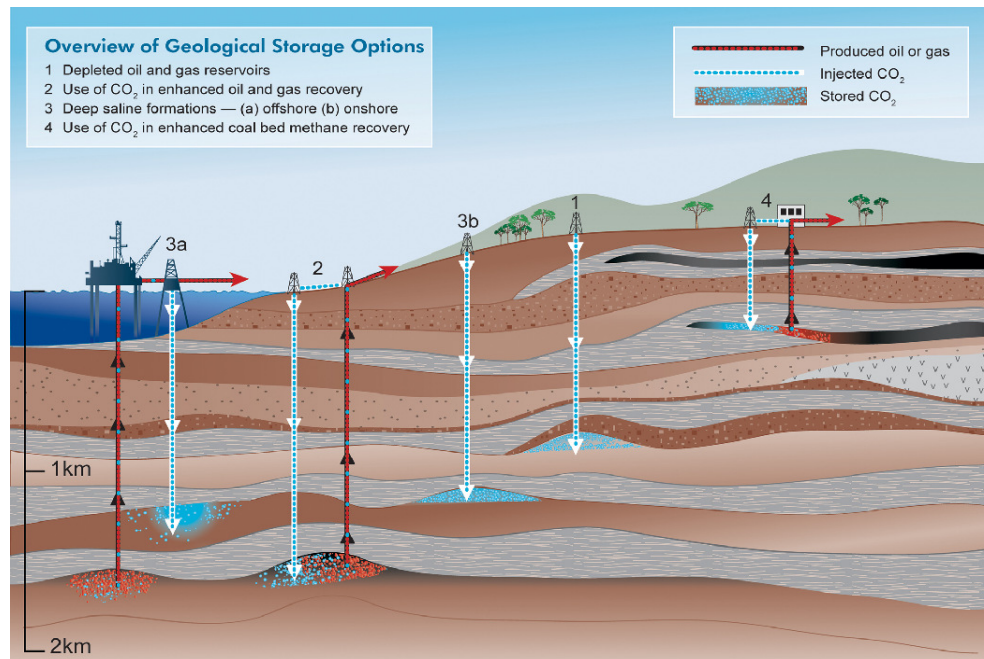
Suolapitoiset muodostumat ovat syviä sedimenttikerrostumia, jotka ovat syntyneet laajojen liuennutta suolaa sisältävien vesialueiden seurauksena. Kerrostumat ovat erittäin laajoja ja sisältävät runsaasti vettä, mutta korkean suolapitoisuutensa vuoksi lähes käyttökelvottomia ihmiskunnan juomavedeksi ja maatalouden kulutuskäyttöön.

Hiilidioksidin varastointiin näitä on jonkin verran käytetty mm. Seipner projektissa pohjanmerellä. Projekti alkoi vuoden 1996 lopussa ja uskotaan, että tämän aikana saadaan varastoiduksi yli 20 megatonnia hiilidioksidia. /17/

#### 5.4.3 Louhintaan sopimattomat hiilikerrostumat

Hiilidioksidin varastointi vanhoihin hiilikenttiin perustuu hiilessä oleviin pieniin halkeamiin. Halkeamien välissä on suuria määriä mikrohuokoisia, joihin kaasumolekyylit absorboituvat tiukasti. Hiili pystyy absorboimaan useita kaasuja ja voi sisältää  $25 \text{ m}^3$  metaania yhtä hiilitonnia kohti. Sopivaan hiilikerrostumaan injektoitu hiilidioksidi absorboituu ja tarjoaa pysyvän varaston. Injektoitu hiilidioksidi hiilikerrostumassa syrjäyttää siinä olevan metaanikaasun, joka voidaan talteenottaa ja käyttää hyödyksi mm. voimalaitoksissa. Hiilikentässä olevaa hiilidioksidia voidaan myöhemmin myös louhia, mikäli sen kaasunläpäisykyky on riittävä. /17/





Kuva 24. Geologisia varastointimenetelmiä. 1: vanha öljy-kaasuvarasto. 2: kaasun ja öljyn talteenoton parantaminen hiilidioksidilla. 3a, 3b: meren tai mantereen alla olevat suolapitoiset muodostumat. 4. hiilidioksidin käyttö parannetussa metaanin talteenotossa. Sinivalkoinen viiva kuvaa injektoitua hiilidioksidia ja sininen kerrostuma varastoitua hiilidioksidia. Punamusta viiva kuvaa tuotettua öljyä/kaasua. /17/

#### 5.4.4 Akvifereihin varastointi

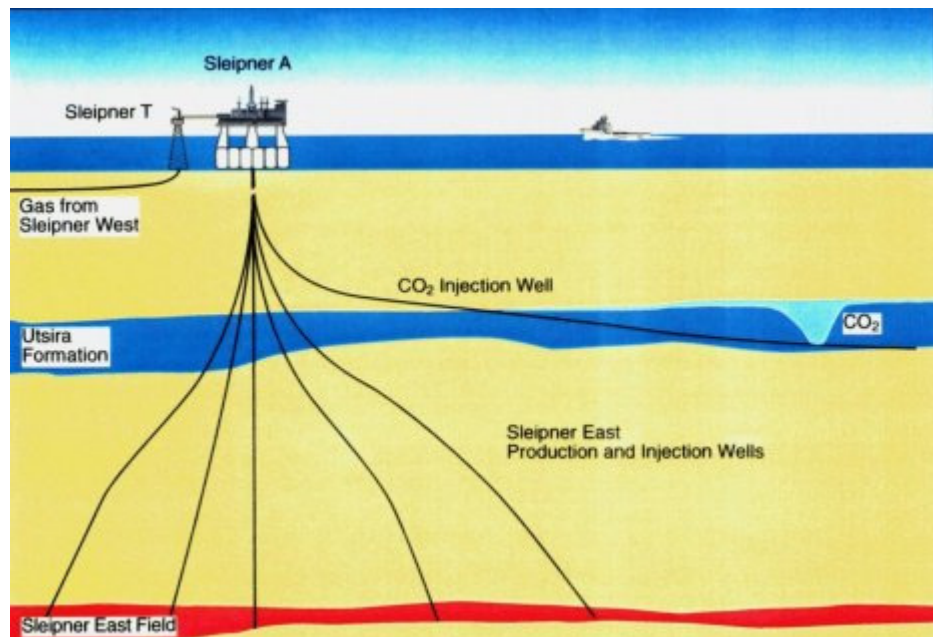
Akviferillä tarkoitetaan huokoista kivistä tai savesta muodostunutta petiä, johon voidaan varastoida hiilidioksidia sisältävää kaasua (kuva 25). Nämä ovat tällä hetkellä melko lupaavia hiilidioksidin varastointiin tarkoitettuja varastoja, sillä niiden varastointikapasiteetti on suuri esim. vanhoihin hiili- ja öljyvarastoihin verrattuna. Jotta akviferi sopii varastoksi, sen on täytettävä seuraavat kriteerit:

- kerroksen korkeimman pisteen tulee olla vähintään 800 metrin syvyydessä ja sen on oltava riittävän huokoinen
- kerroksella on oltava korkea veden läpäisykyky, jotta se käy varastoksi.

Hiilidioksidia voidaan injektoida kahdella tavalla akviferiin. Menetelmät ovat hydrodynaaminen menetelmä ja mineraalimenetelmä.

Hydrodynaamisessa menetelmässä hiilidioksidi syötetään akviferiin, joko kaasumaisessa tilassa tai ylikriittisessä tilassa (hiilidioksidi saavuttaa ylikriittisen tilan noin 800 metrin syvyydessä). Akviferin sisällä syötetty hiilidioksidi virtaa samaa nopeutta siellä olevan veden kanssa. Virtaus vauhti vaihtelee 1–10 cm/vuosi ja tällä nopeudella hiilidioksidia varastoituu kymmeniä kilometrejä miljoonissa vuosissa.

Mineraali menetelmässä hiilidioksidin varastoituminen akviferiin perustuu kemialliseen reaktioon. Tässä hiilidioksidi reagoi mineraalien ja orgaanisten aineiden kanssa muodostaen kiinteitä pysyviä karbonaattimineraaleja. Hiilidioksidi on lähes harmitonta, sillä se pysyy miljoonia vuosia kiinteässä olo-  
muodossa. /32/



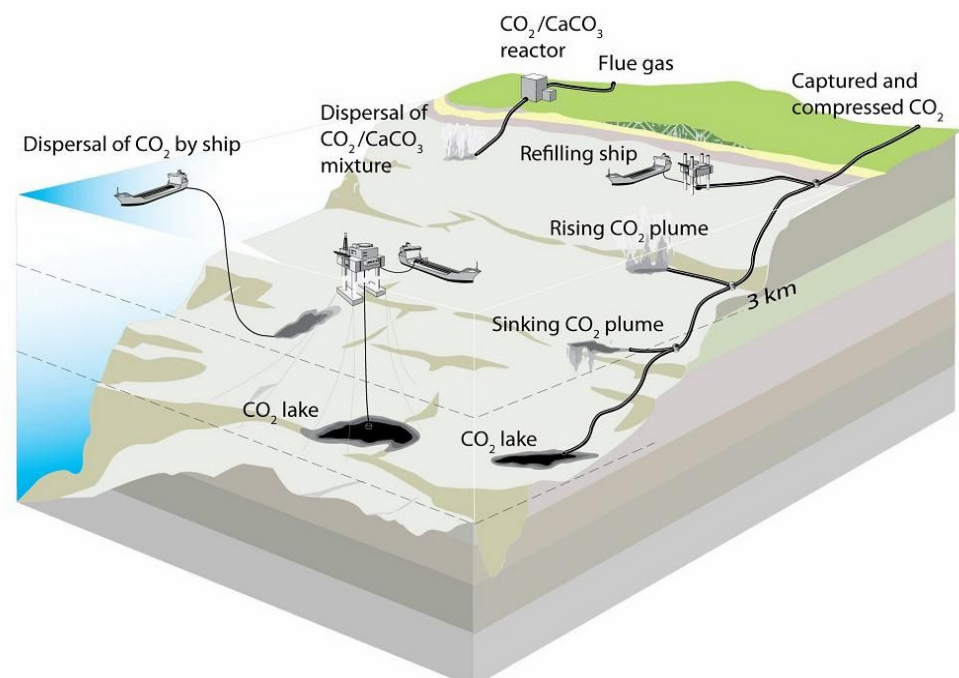
Kuva 25. Periaatekuva hiilidioksidin varastoinnista akvifereihin /32/.

## 5.5 Merenalainen varastointi

Vartenotettava vaihtoehto hiilidioksidin varastoimiselle on injektointi suoraan mereen, jossa se on tämän avulla täysin eristäytynyt ilmakehästä. Syvyyden, johon hiilidioksidi injektoidaan, tulisi olla vähintään 1000 metriä. Prosesseista taiteenotettu hiilidioksidi kuljetetaan keskellä valtamerta olevalle varastolle, josta se injektoidaan suoraan syvälle mereen tai meren poh-

jaan mm. merenalaisiksi hiilidioksidijärviksi. Varastointi valtamereen voidaan myös suorittaa levittämällä hiilidioksidi suoraan laivasta tai suoraan putkilinjasta (kuva 26). Ajan myötä mereen varastoitu hiilidioksidi liukenee ja hajoaa kiteiksi, minkä jälkeen se osallistuu osaksi hiilen kiertoa.

Menetelmä on tällä hetkellä vasta laboratoriotutkimusvaiheessa, sillä hiilidioksidia ei vielä ole varastoitu meriin suuria määriä. Ongelmiksi muodostuvat lähinnä eliökehää koskevat ympäristöriskit. Varastointi tapahtuisi syvällä meressä teoriassa valolta ulottumattomissa, missä luonnollista fotosynteesiä ei esiinny /17/.



Kuva 26. Merenalaisia hiilidioksidin varastointimenetelmiä /17/.

## 6 HIILIDIOKSIDIN HYÖTYKÄYTTÖ

Hiilidioksidin talteenoton jälkeen on ympäristön ja ekonomian kannalta suuri houkutus saada hiilidioksidi hyötykäytetyksi. Hyötykäyttö voidaan jakaa kahden eri menetelmään:

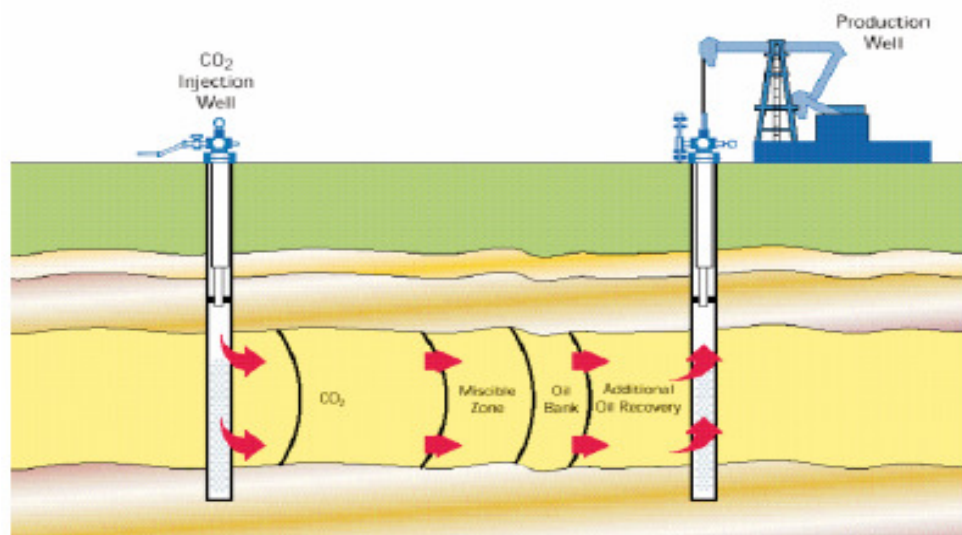
- lyhytaikainen käyttö, jossa hiilidioksidi ”varastoidaan” juomiin ja täten hyötykäytetään nopeasti

- pitkäaikainen hyötykäyttö, jossa hiilidioksidia käytetään geologisista varastoista.

Nykypäivänä hallitsevin alue hiilidioksidin hyötykäyttöä ajatellen on EOR-menetelmä. Hyötykäytetyn hiilidioksidin määrä verrattuna vapautuviin päästöihin on kuitenkin varsin pieni. /33/

## 6.1 EOR-menetelmä

Lyhenne EOR tulee sanoista Enhanced Oil Recovery, jolla tarkoitetaan parannettua öljyn pumppausta (kuva 27). Menetelmä ei ole mikään uusi, sillä sen juuret johtavat 1970-luvulle. Käyttö on kuitenkin kasvanut merkittävästi vuosien saatossa, johtuen kehittyneistä hiilidioksidin siirto- ja talteenotto menetelmistä. /33/



Kuva 27. Parannettu öljyn pumppaus hiilidioksidin avulla /33/.

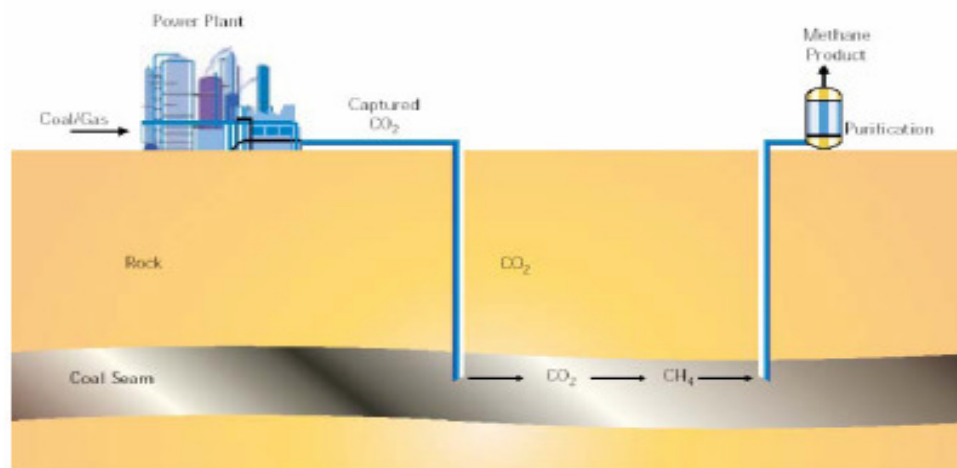
EOR-menetelmä perustuu hiilidioksidin suoraan ruiskutukseen käytössä olevaan öljykenttään. Öljykentässä hiilidioksidi sekoittuu öljyn kanssa, minkä seurauksena öljy paisuu ja virtaus paranee. Tämän avulla on helpompi ylläpitää öljyn painetta ja virtausnopeutta. Injektoidusta hiilidioksidista huomattava osa jää öljykenttään pitkiksi ajoiksi, ja on arvioitu, että pelkästään menetelmän avulla hiilidioksidia voidaan varastoida 130 gigatonnia.

Nykypäivänä menetelmän avulla tuotetaan öljyä lähes 35 000 m<sup>3</sup> päivässä, mikä vastaa 210 000:ta tynnyriä. Luvun uskotaan nousevan uusien öljykenttien paljastumisen myötä. /33/

## 6.2 ECBM-menetelmä

Lyhenne ECBM tulee sanoista Enhanced Coal Bed Methane Recovery, jolla tarkoitetaan parannettua metaanin talteenottoa hiilikentistä. Syvät louhimattomat hiilikentät ovat osoittautuneet käyttökelpoisiksi hiilidioksidin varastointipaikoiksi. Hiilikentässä esiintyy myös suuria määriä luonnostaan metaania. Metaani on kasvihuonekaasu, mutta energiantuotannon kannalta hyvin tärkeä polttoaine vähäisten päästöjen ja edullisuutensa vuoksi. Tämän vuoksi on houkuttelevaa talteenottaa metaania hiilikentistä. Metaanin talteenotto tapahtuu poraamalla syviä kuiluja maanpinnalta hiilikenttiin, joihin hiilidioksidi injektoidaan. Hiili absorboi hiilidioksidin, ja tämän seurauksena metaani desorboituu ja ohjataan tuotantokuilun kautta maanpinnalle olevaan vedenerottimeen. Metaani on tämän jälkeen valmista kuljetettavaksi (kuva 28).

Menetelmää käytetään lähinnä Pohjois-Amerikassa ja se on laajalti kehitteillä Euroopassa ja Aasiassa. /33/



Kuva 28. Metaanin talteenotto hiilikentästä /33/.

### 6.3 Muita menetelmiä

#### *Elintarviketeollisuus*

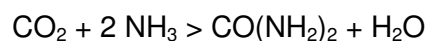
Fossiilisilla polttoaineilla toimivat teollisuus ja energialaitokset tuottavat korkeapitoista hiilidioksidia, jota käytetään ruoka- ja juomateollisuudessa. Tuotetuista palokaasuista erotetaan hiilidioksidi käyttämällä amiini kaasupesureita. Näitä tuotantolaitoksia on mm. Yhdysvalloissa, Malesiassa, Japanissa ja Brasiliassa. Yhdysvalloissa tuotantolaitoksen toiminta perustuu hiilen leijukerrospolttoon, ja muissa polttoaineena käytetään kaasua tai öljyä.

#### *Kemiallinen hyötykäyttö*

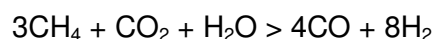
Tärkeimpiä talteenotetun hiilidioksidin kemiallisia hyötykäyttökohteita ovat:

- urean valmistus
- metanolin valmistus
- polykarboonaattien valmistus
- salisyylihapon valmistus.

Ureaa valmistetaan nestemäisestä ammoniakista ja hiilidioksidista korkeassa paineessa ja lämpötilassa, ja välituotteena saadaan ammoniumkarbamaattia. Urea valmistusreaktio on kondensaatio, jossa lohkeaa vettä:

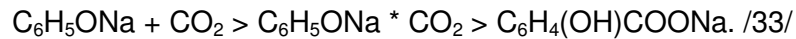


Metanoli ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) on tärkeimpiä kemianteollisuuden raaka-aineita ja sen valmistuksessa käytetään perinteisesti synteetisikaasua. Kuitenkin metanolin tuotanto on yleisesti yhdistetty ammoniakin tuotantoon, sillä se voi käyttää hyväkseen metaanin reformoinnissa tuotettua hiilidioksidia.



Polykarbonaatteja käytetään polyalkyylikarbonaattimuovien valmistukseen. Muoveja käytetään mm. juomapulloissa, elektroniikkateollisuudessa ja auton osissa, jossa se korvaa lasin. Polykarbonaatin etuja ovat, keveys, iskunkestävyys ja laaja käyttölämpötila. Valmistusprosessissa käytetään lähtöaineenä fosgeenia ja ympäristölle vaarallista vesiliukoista metyleenikloridia.

Salisyylihappo on lähtöaine asetosalisyylihapolle, joka tunnetaan paremmin nimellä aspiriini. Salisyylihappo valmistetaan termokemiallisella menetelmällä, jossa natriumfenoksidi lämmitetään kuuman hiilidioksidi virran avulla. Salisyylihapon valmistuksen syntetisoi Saksalainen Hermann Kolbe.



## 7 YHTEENVETO

Nopeasti lisääntyvät hiilidioksidipäästöt, niiden seurauksena voimistuva kasvihuoneilmiö sekä ilmaston lämpeneminen ovat saaneet suurta keskustelua aikaan. Teollisuuden ja energiantuotannon osalta voimistuneeseen kasvihuoneilmiöön vastataan hiilidioksidin talteenotolla käyttämällä yhä enemmän ympäristöystävällisiä polttoaineita ja näin saamaan tuotetut päästöt mahdollisimman pieniksi.

Hiilidioksidin talteenotto yleistyneä tulevaisuudessa voimalaitoksissa ja teollisuuden prosessilaitoksissa. Perimmäisenä tarkoituksena on vähentää ilmakehään vapautuvia päästöjä ja samalla vähentää kasvihuoneilmiötä. Hiilidioksidi, joka otetaan talteen savukaasuista, voidaan jälkeinpäin käyttää hyödyksi mm. elintarviketeollisuudessa ja öljyntuotannossa.

Hyötykäyttöä voidaan ajatella myös heikkona puolena. Käytettäessä hiilidioksidia esimerkiksi parannetussa öljyntuotannossa, mahdollistetaan öljyn pumppaus yhä vaikeammistakin paikoista ja turvataan näin öljyn saanti tiettyiksi ajoiksi eteenpäin. Ongelmaksi voi tämän vuoksi muodostua öljyn samansuuruinen käyttö, eikä siirtymistä vaihtoehtoihin energianlähteisiin oteta riittävän vakavasti. Vaikka menetelmiä kohti puhtaampaa tulevaisuutta kehitetään jatkuvasti ja päästöjä saadaan pienettyä, olisi kuitenkin tärkeää suosia uusiutuvia energianlähteitä ja bioenergiaa näiden ympäristöystävällisyyden vuoksi.

Tutkimuksen perusteella hiilidioksidin talteenottoprosesseista yleisimmin käytössä olevaksi menetelmäksi voidaan luokitella jälkipolttotalteenotto. Menetelmän suuri suosio perustuu hyvään hiilidioksidin erotushyötysuhteeseen, varmaan toimivuuteen sekä helposti yhdistettävään sähkön ja lämmön tuotantoprosessiin. Jälkipolttotalteenotossa erotusmenetelmistä suurimman

suosion ovat saavuttaneet absorptiomenetelmä (kemiallinen ja fysikaalinen), adsorptiomenetelmä painetta muuntamalla sekä membraani menetelmä. Kemiallisen absorptiomenetelmän etuja ovat korkea hiilidioksidin erottelukyky ja edullisuus. Lisäksi sen liittäminen voimalaitokseen on yksinkertaista, sillä se toimii omana yksikkönään kemiallisten liuotteiden avulla. Adsorptiomenetelmää painetta muuntamalla käytetään lähinnä vedyn tuotannossa ja ohella hiilidioksidin erotuksessa. Polttoaineen ollessa hiili laskee tämä laitoksen hyötysuhdetta 8–13 %:lla johtuen erotusmenetelmän aiheuttamista prosesseista. Vastaavasti käytettäessä maakaasua on hyötysuhteen lasku hieman pienempi (9–12 %). Erotusprosessin jälkeen hiilidioksidi puristetaan vielä vaadittuun paineeseen, ja tämä vaatii oman tehonsa. Koko laitoksen hyötysuhteen aleneminen on puristusprosessin jälkeen noin 13–14 prosenttia riippuen polttoaineesta ja vaadittavasta puristuspaineesta.

Katsottaessa tulevaisuuteen tiedetään varmasti, että päästöraajat tiukentuvat entisestään. Tämän vuoksi energiantuotannon kannalta on kehitettävä uusia hiilidioksidin talteenottomenetelmiä ja parannettava jo käytössä olevia menetelmiä. Tällä hetkellä kokeilu- ja kehitysvaiheessa on useita menetelmiä, jotka perustuvat kuivaan regeneroivaan menetelmään. Tärkeimpinä menetelminä voidaan pitää Alstomin kehittämää hiilidioksidin erotinpyörää sekä polttokennoja. Alstomin hiilidioksidierotinpyörää tarkasteltaessa ongelmaksi muodostuvat vielä nykypäivänä suuri tilan tarve sekä korkeat hankintakustannukset. Erotinpyörä tarvitsee pelkästään toimiakseen melko suuria investointeja itse voimalaitokseen sekä sen käyttöön. Näitä ovat esimerkiksi pyörän esilämmityspuhaltimet, jotka laskevat laitoksen hyötysuhdetta noin 10 prosentilla. Suuremmissa voimalaitoksissa hyötysuhteen lasku on hieman pienempi. Laitteen etuja ovat kuitenkin edulliset erotuskustannukset, korkea hiilidioksidin erotussuhde sekä pitkäikäisyys. Tulevaisuudessa menetelmää tullaan varmasti käyttämään suurissa voimalaitoksissa ja teollisuuden prosessilaitoksissa.

Toisena lupaavana päästöjen vähentämismenetelmänä voidaan pitää polttokennoja. Näitä pidetäänkin tulevaisuuden energianlähteinä korkean hyötysuhteen ja pienten päästöjen vuoksi. Lisäksi etuina on luotettavuus, sillä liikkuvia osia ei ole. Kehittyneellä nykYTEKNIKALLA polttokennot ovat vielä yhdistettävissä membraanireaktiomenetelmään, jolloin hiilidioksidin talteenottoa saadaan parannettua entisestään. Parhaaseen hyötysuhteeseen pääs-



tään yhdistämällä polttokennot nykyaikaisiin voimalaitoksiin, joissa on sähkön ja lämmön yhteistuotanto. Käyttämällä vielä hyväksi polttokennoilta ylijäävää hukkalämpöä ja yhdistämällä vedyn tuotanto voimalaitokseen voidaan päästä jopa 70 %:n hyötysuhteeseen. Hiilidioksidin talteenotosta johtuva hyötysuhteen lasku tulee puristamisesta ja käsittelemisestä vaatimasta tehosta. Tällöin koko laitoksen hyötysuhteen lasku olisi arviolta noin 3–8 prosenttia. Polttokennojen ongelmiksi muodostuvat kuitenkin niiden korkea hinta. Yhdistäminen vanhempiin voimalaitoksiin vaatisi myös melko suuria toimenpiteitä luotettavan toiminnan kannalta sekä näin ollen suuria kustannuksia.

Talteenotetun hiilidioksidin varastointimenetelmistä yleisimmin käytössä olevaksi menetelmäksi osoittautui geologinen varastointimenetelmä, sillä maapallon maaperässä on varastointikapasiteettiä useita tuhansia gigatonneja jäljellä. Lisäksi varastointi maankuoreen on edullista, ja tämän avulla voidaan myös hyödyntää metaanin talteenottoa.

Tulevaisuutta ajatellen vartenotettava menetelmä hiilidioksidin varastoimiselle on merenalainen varastointi. Nykymittapuussa menetelmä on kuitenkin huomattavasti kalliimpaa geologiseen varastointiin verrattuna eikä tämän vuoksi ole saavuttanut vielä riittävää suosiota.

## VIITELUETTELO

- /1/ Global Greenhouse Gas Data. Greenhouse Gas Emissions [verkkodokumentti, viitattu 25.6.2007]. Saatavissa: <http://www.epa.gov/climatechange/emissions/globalghg.html>
- /2/ Ervasti, Veikko – Kytömäki, Jorma – Paananen Juhani, *Terra Nova. Toimiva maapallo, ihminen ja ympäristö*. 4.–7. painos. Porvoo: WSOY. 2000.
- /3/ Ilmasto.org. Seuraukset [verkkodokumentti, viitattu 25.6.2007]. Saatavissa: <http://www.iti.fi/ilmasto>
- /4/ Ilmasto.org. Kasvihuonekaasut [verkkodokumentti, viitattu 25.6.2007]. Saatavissa: <http://www.ilmasto.org/ilmastonmuutos/perusteet/kasvihuonekaasut.html>
- /5/ Ilmasto.org. Hiilidioksidi [verkkodokumentti, viitattu 27.6.2007]. Saatavissa: <http://www.ilmasto.org/ilmastonmuutos/perusteet/kasvihuonekaasut/hiilidioksidi.html>
- /6/ University of Wisconsin. Third World bears brunt of global warming impacts [Verkkodokumentti, viitattu 27.6.2007]. Saatavissa: <http://www.news.wisc.edu/11878>
- /7/ Ilmasto.org. Metaani [verkkodokumentti, viitattu 27.6.2007]. Saatavissa: [www.ilmasto.org/ilmastonmuutos/perusteet/kasvihuonekaasut/metaani.html](http://www.ilmasto.org/ilmastonmuutos/perusteet/kasvihuonekaasut/metaani.html)
- /8/ Ilmasto.org. Muut kaasut [verkkodokumentti, viitattu 29.6.2007]. Saatavissa: [http://www.ilmasto.org/ilmastonmuutos/perusteet/kasvihuonekaasut/muut\\_kasut.html](http://www.ilmasto.org/ilmastonmuutos/perusteet/kasvihuonekaasut/muut_kasut.html)
- /9/ Ilmasto.org. Päästöjen vähentäminen Suomessa [verkkodokumentti, viitattu 29.6.2007]. Saatavissa: [http://www.ilmasto.org/ilmastonmuutos/torjuminen/paastojen\\_vahentaminen\\_suomessa.html](http://www.ilmasto.org/ilmastonmuutos/torjuminen/paastojen_vahentaminen_suomessa.html)
- /10/ Ilmasto.org. Liikenne [verkkodokumentti, viitattu 3.7.2007]. Saatavissa: [http://www.ilmasto.org/ilmastonmuutos/torjuminen/paastojen\\_vahentaminen\\_suomessa/liikenne.html](http://www.ilmasto.org/ilmastonmuutos/torjuminen/paastojen_vahentaminen_suomessa/liikenne.html)
- /11/ Ilmasto.org. Uusiutuva Energia [verkkodokumentti, viitattu 5.7.2007]. Saatavissa: [http://www.ilmasto.org/ilmastonmuutos/torjuminen/paastojen\\_vahentaminen\\_suomessa/uusiutuva\\_energia.html](http://www.ilmasto.org/ilmastonmuutos/torjuminen/paastojen_vahentaminen_suomessa/uusiutuva_energia.html)
- /12/ Energiateollisuus ry. Vesivoima [verkkodokumentti, viitattu 8.7.2007]. Saatavissa: <http://www.energia.fi/fi/sahko/sahkontuotanto/vesivoima>
- /13/ Ilmasto.org. Ydinvoima ja hiilen talteenotto [verkkodokumentti, viitattu 9.7.2007]. Saatavissa: [http://www.ilmasto.org/ilmastonmuutos/torjuminen/paastojen\\_vahentaminen\\_suomessa/ydinvoima\\_ja\\_hiilen\\_talteenotto.html](http://www.ilmasto.org/ilmastonmuutos/torjuminen/paastojen_vahentaminen_suomessa/ydinvoima_ja_hiilen_talteenotto.html)
- /14/ Australian Uranium Association. Nuclear power in the world today [verkkodokumentti, viitattu 13.7.2007]. Saatavissa: <http://www.uic.com.au/nip07.htm>

- /15/ CO<sub>2</sub> Capture Technologies and Opportunities in Canada. Strawman document for CO<sub>2</sub> capture and storage (CC&S) Technology roadmap [verkkodokumentti]. 18–19.12.2003 [viitattu 15.7.2007]. Saatavissa: [http://www.nrcan.gc.ca/es/etb/cetc/combustion/co2trm/pdfs/co2\\_capture\\_strawman\\_feb2004.pdf](http://www.nrcan.gc.ca/es/etb/cetc/combustion/co2trm/pdfs/co2_capture_strawman_feb2004.pdf)
- /16/ Wong, Sam – Bioletti, Rob, Carbon Dioxide Separation Technologies [verkkodokumentti]. 2002 [viitattu 15.7.2007]. Saatavissa: <http://www.aidis.org.br/span/ftp/CARBON%20DIOXIDE%20SEPARATION%20TECHNOLOGIES.pdf>
- /17/ Metz, Bert – Davidson, Ogunlande – De Conick, Heleen – Loos, Manuela – Meyer, Leo, IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage [verkkodokumentti]. 2005 [viitattu 18.7.2007]. Saatavissa: <http://www.ipcc.ch/activity/srccs/SRCCS.pdf>
- /18/ CO<sub>2</sub> Capture and Storage. European Energy Forum Website [verkkodokumentti, viitattu 19.7.2007]. Saatavissa: <http://www.europeanenergyforum.eu/archives/european-energy-forum/environmental-matters/co2-capture-and-storage-2013-part-of-the-solution-to-the-climate-change-problem>
- /19/ CRC for Coal in Sustainable development. Oxy-Fuel Combustion [verkkodokumentti]. 2002 [viitattu 19.7.2007]. Saatavissa: <http://www.ccsd.biz/factsheets/oxyfuel.cfm>
- /20/ The Capture and Sequestration of Carbon Dioxide. Solvent absorption [verkkodokumentti, viitattu 20.7.2007]. Saatavissa: <http://www.esru.strath.ac.uk/>
- /21/ Mitsubishi Heavy Industries, LTD. Flue Gas CO<sub>2</sub> Recovery System [verkkodokumentti, viitattu 26.7.2007]. Saatavissa: [http://www.mhi.co.jp/machine/e/product/enviro/flue\\_gas\\_c.htm](http://www.mhi.co.jp/machine/e/product/enviro/flue_gas_c.htm)
- /22/ The PSA Process. [Verkkodokumentti, viitattu 26.7.2007]. Saatavissa: <http://www.uop.com/objects/psaanimation.html>
- /23/ Linde AG. Hydrogen and Synthesis Gas Plants [verkkodokumentti, viitattu 29.7.2007]. Saatavissa: [http://www.linde-engineering.com/process\\_plants/hydrogen\\_syngas\\_plants/index.php](http://www.linde-engineering.com/process_plants/hydrogen_syngas_plants/index.php)
- /24/ Air Liquide. Carbon Dioxide Membrane [verkkodokumentti, viitattu 25.6.2007]. Saatavissa: <http://www.medal.airliquide.com/en/membranes/carbon/index.asp>
- /25/ A VGB Report on the State of Art. CO<sub>2</sub> Capture and Storage [verkkodokumentti, viitattu 15.8.2007]. Saatavissa: [http://www.vgb.org/data/vgborg\\_/Fachgremien/Umweltschutz/VGB%20Capture%20and%20Storage.pdf](http://www.vgb.org/data/vgborg_/Fachgremien/Umweltschutz/VGB%20Capture%20and%20Storage.pdf)
- /26/ Insurgent 49. Carbon sequestration [verkkodokumentti, viitattu 20.8.2007]. Saatavissa: [http://www.insurgent49.com/yanity\\_black\\_gold2.html](http://www.insurgent49.com/yanity_black_gold2.html)
- /27/ Chiesa, Pablo – G.Kreutz, Thomas – G. Lozza, Giovanni, CO<sub>2</sub> Sequestration From IGCC Power Plants by Means of Metallic Membranes. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* (2007), s. 123-127.

- /28/ Quest Tru Tec LP. [Verkkodokumentti, viitattu 25.8.2007]. Saatavissa: <http://www.questtrutech.com/Portals/0/Pipeline.JPG>
- /29/ Anthony Veder. Coral Carbonic [verkkodokumentti, viitattu 28.8.2007]. Saatavissa: <http://www.anthonnyveder.nl/fleet/4>
- /30/ Tomco Equipment Company. D.O.T Flatbed Mounted Unit [verkkodokumentti, viitattu 29.8.2007]. Saatavissa: <http://www.tomcoequipment.com/print/driveout.htm>
- /31/ CO2 Sequestration. Different types of geological formations [verkkodokumentti, viitattu 3.9.2007]. Saatavissa : [http://www.princeton.edu/~chm333/2002/fall/co\\_two/geo/](http://www.princeton.edu/~chm333/2002/fall/co_two/geo/)
- /32/ CO2 Sequestration. Aquifers [verkkodokumentti, viitattu 3.9.2007]. Saatavissa : [http://www.princeton.edu/~chm333/2002/fall/co\\_two/geo/aquifers.html](http://www.princeton.edu/~chm333/2002/fall/co_two/geo/aquifers.html)
- /33/ Zero Emissions Technologies for Fossil Fuels. *CO2 Utilization 2003* [verkkodokumentti, viitattu 15.9.2007]. Saatavissa: [http://www.iea.org/dbtw-wpd/textbase/papers/2003/CO2\\_Util\\_Fossil\\_Fuels.pdf](http://www.iea.org/dbtw-wpd/textbase/papers/2003/CO2_Util_Fossil_Fuels.pdf)